

Rund 1970

VÄRME- OCH MASSTRANSPORT VID
STEKNING AV FÄRSPRODUKTER

Mätteknik, matematiska modeller
och datorsimuleringar

Per Sörenfors
civilingenjör

Avhandling för teknisk doktorsexamen



**DIVISION
OF
FOOD ENGINEERING**

AVDELNINGEN FÖR LIVSMEDELSTEKNIK

**LUND INSTITUTE OF TECHNOLOGY
LUND - SWEDEN**





Lund 1978

VÄRME- OCH MASSTRANSPORT VID
STEKNING AV FÄRSPRODUKTER

Mätteknik, matematiska modeller
och datorsimuleringar

Per Sörenfors
civilingenjör

Avhandling för teknisk doktorsexamen



Avhandlingen kommer att försvaras på svenska vid en offentlig
disputation i sal E, Kemicentrum, Lund, lördagen den 9 dec 1978,
kl 10.15.



Verhandlungen des Ausschusses für die Revision des
Gesetzes über die Verfassung des Reiches vom 1. April 1871.
XI 10.12.

Dokumentutgivare
Lund institute of Technology, Sweden
Handläggare

Dokumentnamn
Dissertation
Utgivningsdatum

Dokumentbeteckning
LUTKDH/(TKLT-1002)
001-270/(1978)

Författare

1978-11-14

Per Sörenfors

1074

Dokumenttitel och undertitel

Värme- och masstransport vid stekning av färsprodukter.
Mätteknik, matematiska modeller och datorsimuleringar.

Heat- and mass transfer in frying of minced meat products.
Measuring techniques, mathematical models and computer simulations.

Referat (sammandrag)

The work deals with temperature measuring techniques, physical phenomenons of heating, comparisons between different methods of frying, mathematical models and computer programs for the simulation of frying.

Errors arising from thermocouple measurements are calculated with computer. A method for measuring the centre temperature in meat balls by means of heat photography has been investigated. Formulas have been derived, describing physical properties for minced meat as function of water content, fat content and temperature. A comparative study of the four frying methods: deep fat-, contact-, infrared radiation and convection oven frying, is mapping basic relations between different frying parameters. A mathematical model and a computer program for heat- and mass transfer has been developed, by means of which the frying of meat patties and meat balls can be simulated as related to centre temperature, surface colour, weight loss etc.

Referat skrivet av

Author

Förslag till ytterligare nyckelord

4470

Klassifikationssystem och -klass(er)

5070

Indextermer (ange källa)

5170

Omfång

270

Övriga bibliografiska uppgifter

5672

Språk

Svenska

Sekretessuppgifter

6070

ISSN

6074

ISBN

6076

Dokumentet kan erhållas från

Chemical Center
Food Engineering
P.O.B. 50, S-230 53 Alnarp, Sweden

Mottagarens uppgifter

6274

Pris

6570

VÄRME- OCH MASSTRANSPORT VID STEKNING AV FÄRSPRODUKTER.
Mätteknik, matematiska modeller och datorsimuleringar.

Per Sörenfors, Lunds tekniska högskola,
Avd för livsmedelsteknik, Box 50, 230 53 Alnarp.

Denna avhandling är baserad på följande sju publikationer
och rapporter: (del IV och V i manus men accepterade för publ.)

- I Sörenfors, P.
Mätning av centrumtemperatur med termoelement under stekning.
Rapport 4 sept 1978, Livsmedelsteknik, Alnarp.
- II Sörenfors, P.
Determination of the temperature distribution in deep fat
fried meat balls, by means of heat photography.
Lebensmittel Wissenschaft und Technology vol 7 (1974) no 2.
- III Sörenfors, P., Dagerskog, M.
Bestämning av värmetekniska data för köttfärs som funktion
av temperatur och receptur.
SIK-rapport nr 434. SIK, Göteborg.
- IV Dagerskog, M., Sörenfors, P.
A comparison between four different methods of frying meat
patties, Part 1.
Lebensmittel Wissenschaft und Technology vol 11 (1978).
- V Dagerskog, M., Sörenfors, P.
A comparison between four different methods of frying meat
patties, Part 2.
Lebensmittel Wissenschaft und Technology vol 11 (1978).
- VI Sörenfors, P.
Matematiska modeller för stekning av köttfärsprodukter.
Rapport 12 okt 1978, Livsmedelsteknik, Alnarp.
- VII Sörenfors, P.
Datorprogram för stekning av köttfärsprodukter.
Rapport 25 aug 1978, Livsmedelsteknik, Alnarp.

Innehåll.

	sid
Förord	1
Abstract	3
Sammanfattning	4
1. Bakgrund	5
2. Målsättning	5
3. Omfattning	6
4. Grundunderlag	6
4.1. Temperaturmätning	6
4.2. Fysikaliska data	10
4.3. Jämförelse mellan stekmetoder	12
5. Matematiska modeller	18
6. Datorprogram	22
7. Arbetets praktiska nytta	25
8. Referenser	27
9. Bilagor (publikationerna 1-7)	31

Förord.

Följande arbete har utförts vid Lunds tekniska högskola, avdelningen för livsmedelsteknik i Alnarp under åren 1973 till 1978.

Jag vill först och främst tacka min handledare och examinator professor Bengt Hallström för starkt stöd och ett mycket stimulerande samarbete.

Jag vill också tacka min forskarkollega vid SIK i Göteborg, tekn dr Magnus Dagerskog, för det intressanta samarbete som resulterade i flera gemensamma publikationer.

Ingenjör Anders Ånäs rullade inte bara köttbullarna, utan svarade för all utrustning, och utförde de många gånger kinkiga försöken med osviklig precision.

Instrumentmakare Göran Ritzing konstruerade flera sinnrika apparater, vilka möjliggjorde många experiment.

Slutligen riktas också ett varmt tack till institutionssekreterare Inger Larsson som satte hela arbetet på pränt och till vår institutions dator, som ritade de flesta av avhandlingens diagram.

Styrelsen för teknisk utveckling, STU, ställde ekonomiska resurser till förfogande, utan vilka arbetet inte hade kommit till stånd.

Abstract.

The work deals with temperature measuring techniques, physical phenomenons of heating, comparisons between different methods of frying, mathematical models for frying and computer programs for the simulation of frying.

Errors arising from thermocouple measurements are calculated with computer programmes in order to find adequate measuring parameters, such as wire diameters, materials, local position etc.

A method for measuring the centre temperature in meat balls by means of heat photography has been investigated.

Two convenient methods for measuring the thermal conductivity and heat capacity respectively, have been worked out. By means of these, formulas have been derived, describing physical properties for minced meat as function of water content, fat content and temperature.

A comparative study of the four frying methods: deep fat-, contact-, infrared radiation- and convection oven frying, is mapping basic relations between different frying parameters, such as time, centre temperature, weight loss, surface colour etc. By means of a taste panel the methods were optimized, after which the methods were compared.

Different mathematical models for heat- and mass transfer were surveyed. Some heat transfer mechanisms were rejected, while other were further developed. By means of computer simulations experimental frying results were compared with the models. One model has been developed, by means of which the frying of meat patties and meat balls can be simulated as related to centre temperature, surface colour, weight loss etc. The frying methods are primarily deep fat frying and contact frying. The model is intended for the projecting and operating of industrial frying processes.

A computer program, simulating these models has been developed. It is built to be operated as a two-way communication from a terminal, and is therefore provided with a command structure, that makes it easy to communicate with the computer.

Sammanfattning.

Arbetet behandlar temperaturmätteknik, värmefysikaliska data, jämförelser mellan olika stekmetoder, matematiska modeller för stekning och datorprogram för simulering av stekförlopp.

De fel som erhålles vid mätning av temperatur med termo-element beräknas med datorprogram i avsikt att ta reda på lämpliga mätparametrar såsom tråddiametrar, material, placering etc.

En metod har undersökts att mäta centrumtemperatur i köttbullar med värmekamera.

Två snabbmetoder för att mäta värmeledningstal respektive värmekapacitet har utarbetats. Med hjälp av dessa har formler framtagits där värmetekniska data för köttfärs är funktioner av vattenhalt, fetthalt och temperatur.

En jämförande studie av de fyra stekmetoderna fritering, kontakt-, IR- och konvektionsstekning kartlägger grundläggande samband mellan olika stekparametrar såsom tid, centrumtemperatur, viktsförlust, ytfärg etc. Med hjälp av smakpanel optimeras metoderna, varefter en jämförelse göres mellan dem.

Olika matematiska modeller penetreras. Vissa mekanismer för värmetransporten förkastas respektive utvecklas. Med hjälp av datorsimuleringar jämföres experimentella stekresultat med de matematiska modellerna. En modell har utvecklats med vars hjälp stekning av pannbiffar och köttbullar kan simuleras med avseende på bl a centrumtemperatur, ljushet och viktsförlust. Stekmetoderna kan utgöras av i första hand fritering och kontaktstekning. Modellen avses komma till användning vid projektering och drift av industriella steklinjer.

Ett datorprogram har utvecklats för att simulera ovanstående medell/er/. Det är avsett att köras i dialogform från terminal och är därför försett med en kommandostruktur som gör det lätt att kommunicera med datorn.

1. Bakgrund.

Samhället förändras mot fler institutioner, fler stora företag, fler offentliga inrättningar, ålderdomshem etc. I samband med denna strukturförändring har på senare tid antalet måltider som serveras i personalmatsalar, skolor, sjukhus o s v ökat starkt. Detta faktum i förening med ökade personalkostnader har drivit fram en utveckling mot industriell färdiglagad mat. Den ojäm-förlikt största komponenten (m.a.p. priset) i "färdig-mat"-sortimentet är färsprodukterna, t ex pannbiffar, köttbullar, järpar etc.

I den snabba utvecklingen har industrin inte hunnit med att förbättra stektekniken i någon större utsträckning, dels beroende på att det ekonomiskt sett gått så bra ändå och dels därför att utveckling av stektekniken är kostsam. Den alltjämt vanligaste stekmetoden för köttfärsprodukter är fritering. En del nya stekmetoder har dock introducerats, t ex bandstekning och IR-stekning. Det finns starka önskemål att fritering ersättas med annan stekteknik, därför att friteringen, såsom den bedrivits, medför feta produkter och uniform smak. Vid förbättring av äldre, och utveckling av ny stekteknik, d v s nya stekmetoder och kombinationer av metoder, är det mycket värdefullt att kunna göra modellsimuleringar med dator. Det är just här som föreliggande arbete kan få betydelse.

2. Målsättning.

Matematiska modeller för datorsimuleringar används sedan länge inom skilda tekniska områden, även inom livsmedelsindustrin, t ex för beräkning av hålltider vid värmekonservering eller optimering av korvrecept. Vid beräkning av stekprocesser har användningen av datorsimuleringsteknik ännu inte vunnit insteg. Man kan emellertid spara mycket experimentellt och beräknings-tekniskt arbete genom datorsimuleringar. Exempelvis kan optimala tider i de olika stekstegen i en flerstegsanläggning beräknas. Det är också möjligt att förbättra driftsekonomin hos befintliga steklinjer.

Den huvudsakliga målsättningen med föreliggande arbete är därför att ta fram ett användbart datorprogram för simuleringar av exemplifierad typ. Som bas i datorprogrammet måste finnas en matematisk modell, som bör vara så väl teoretiskt underbyggd som möjligt.

3. Omfattning.

En inledande kartläggning av problematiken visade att stora luckor och brister fanns i det fysikaliska underlaget för en matematisk modell. Fysikaliska data för köttfärs saknades, temperaturmättekniken var bristfällig. Inga särskilt omfattande jämförande studier av de olika stekmetoderna hade heller gjorts. För att uppfylla arbetets målsättning var det därför nödvändigt att med experimentella och teoretiska undersökningar fylla nämnda luckor.

Arbetet med den matematiska modellen grundas till allra största delen på fritering av köttbullar. Men det resulterande datorprogrammet kan appliceras på fritering, konvektionsugns- eller bandstekning av runda eller platta färsprodukter.

På det smala och delvis nya fält som detta arbete kommer att behandla finns relativt få tidigare arbeten publicerade.

4. Grundunderlag.

Med detta avses den kunskap som behövs för att realisera huvudmålet med detta arbete, nämligen att skapa en matematisk modell att användas i ett datorsimuleringsprogram. Grundunderlaget utgör temperaturmätteknik, fysikaliska data för köttfärs och jämförande studier av fyra stekmetoder.

4.1. Temperaturmätning.

Mätning av centrumtemperatur under stekning sker vanligtvis med hjälp av termoelement. Det är sedan länge känt att denna mätteknik är förknippad med systematiska mätfel, som huvudsakligen beror på att metalltråden i termoelementet själv leder värme till mätpunkten.

Hostetler et al (1977) /19/ undersökte skillnaden i mätresultat från två olika termoelement av koppar-konstantan. Det mindre hade tråddiametern $8\mu\text{m}$ medan det större hade $48\mu\text{m}$. De fann temperaturskillnader på cirka 5°C vid värmning av kött. Skillnaden var större då termoelementets inträngningsdjup var mindre. De fann också att den värmemängd, som transporterades in via termoelementet åstadkom att köttet blev mer "färdiglagat" intill själva mätpunkten vid användning av det större termoelementet i jämförelse med det mindre.

Det finns också många arbeten gjorda på matematiska beräkningar av mätfelet. Jacob (1957) /21/ behandlar t ex mätning av temperaturen av ett strömmande medium i ett rör. Packer et al (1974) /35/ gör motsvarande för konservburkar. Boelter et al (1944) /7, 8/ beräknar mätfel vid yttemperaturmätning. Några generella formler för mätfel har inte åstadkommits eftersom det finns alltför många sätt att variera problemet.

Delpublikation I behandlar temperaturmätning i köttfärsprodukter med termoelement under stekning. Med experiment visas att temperaturgradienten i produkten ger störst bidrag till mätfelet. Med hjälp av ett datorprogram tas en formel fram för mätfelets storlek när termoelementet ligger i ett fält av konstant sjunkande temperatur. Denna formel lyder:

$$E = G \cdot D \cdot (\sqrt{F} - 1) \cdot 0.64$$

där E är mätfel ($^{\circ}\text{C}$)

G är temperaturgradienten i trådens längdriktning ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$)

D är tråddiameter (m)

F är förhållande mellan värmeledningstalen för trådmaterialet och köttfärsen (-)

Av formeln kan man dra en del intressanta slutsatser:

1. Mätfelet är proportionellt mot termoelementtrådens diameter. Tunna trådar bör därför användas.
2. Mätfelet är proportionellt mot temperaturgradienten. Därför bör man vid mätning på biffar placera tråden så att den följer centralplanet. D v s införes från sidan.
3. Mätfelet är beroende på vilka material som ingår i

termoelementet. Om man väljer chromel-alumel blir felet en tredjedel av felet hos koppar-konstantan.

Vid normal stekning av köttbullar har man ingen konstant temperaturgradient. Dessutom är gradienten alltid noll vid spetsen på termoelementet (om spetsen ligger i centrum). Därför blir mätfelet i verkligheten mindre än med formeln ovan.

Ett annat datorprogram konstruerades för att simulera verkliga temperaturmätningar i köttbullar och pannbiffar. Med detta är det också möjligt att simulera ett arrangemang där den del av termoelementtråden, som befinner sig utanför produkten, skyddas av en hylsa så att det värmande mediet, t ex frityr-fett, inte kommer i kontakt med termoelementet.

Nedanstående tabell visar exempel på nämnda simuleringar efter att centrum stigit till 32°C (begyn.temp 25°C).

mätfel ($^{\circ}\text{C}$)		med hylsa			utan hylsa		
		bulle	biff ₁	biff ₂	bulle	biff ₁	biff ₂
koppar/ konstan- tan	0.1 mm	1.3	6.8	0.0	1.3	7.7	0.0
	0.2 mm	5.6	18.2	0.0	6.1	28.6	0.0
	0.4 mm	16.2	32.5	0.1	24.4	60.3	0.3

chromel/ alumel	0.1 mm	0.4	2.3	0.0	0.4	2.3	0.0
	0.2 mm	1.8	8.1	0.0	1.8	9.3	0.0
	0.4 mm	6.8	20.1	0.0	7.4	32.1	0.0

biff₁ = termoelementet från platta sidan

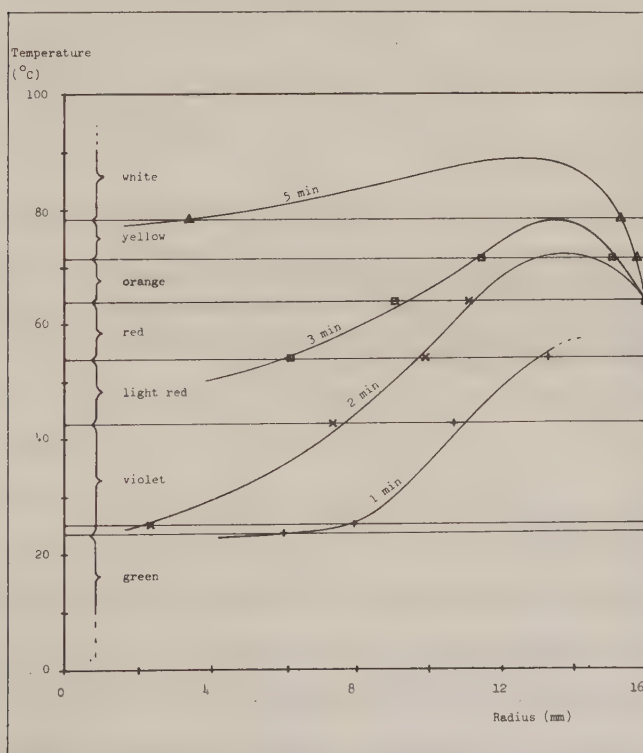
biff₂ = termoelementet från periferisidan.

Det framgår av tabellen ovan att man vid temperaturmätning avsevärt kan reducera mätfelen genom att använda chromel-alumel istället för koppar-konstantan. Större tråddiameter än 0.1 mm bör inte användas. Vid mätning på biffar erhålles rätt resultat i stort sett oberoende av olika faktorer, bara inplaceringen sker från periferin. Vidare kan konstanteras att en skyddande hylsa har positiv verkan, men bara då felen är stora.

En annan metod för temperaturmätning är värmefotografering. Denna teknik /publ. II/ har utvecklats för mätning av centrumtemperatur. Metoden går i stora drag ut på att snabbt dela en köttbulle (eller annan produkt) mitt itu och omedelbart därefter fotografera snittytan med en utrustning för värmefotografering, kallad Thermovision, som utvecklats av AGA Infrared Systems Ltd.

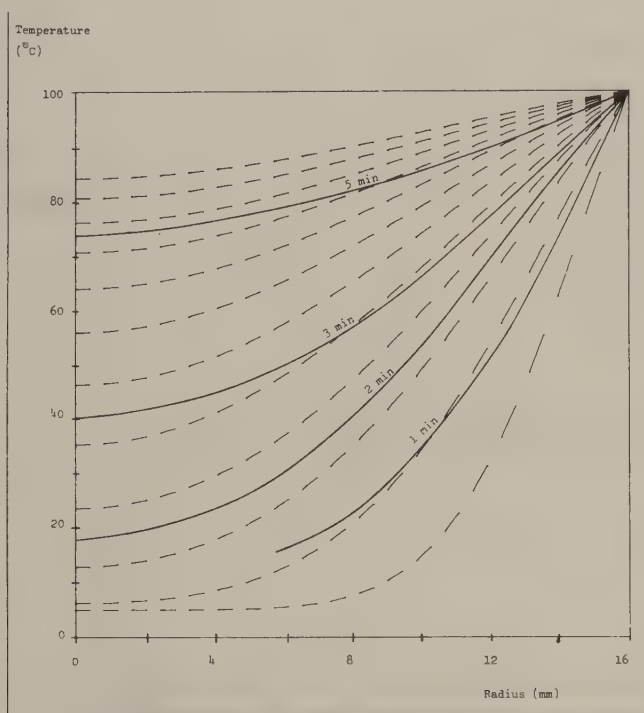
Ett experiment gick till så att en köttbulle friterades i viss tid-temperaturkombination, varefter den togs upp 10 sekunder före mättid. Under denna tid hann man placera bullen i en speciell hållare. Ett par sekunder före mättid startades en motorkamera som tog 10 å 15 bilder med en hastighet av 2 bilder per sekund. På detta sätt erhöles alltid en bild senast en halv sekund efter att köttbullen snittats itu (= mättid). Det är viktigt eftersom snittytan snabbt kyls. Bilderna bestod av ett antal koncentriska färgade ringar. Varje färg motsvarade ett temperaturintervall. I nedanstående figur visas resultatet av fyra utvärderade bilder.

Temperature distribution in a meat ball according to Thermovision measuring. Oil temperature 160°C



Man kan se att ytan (ej snittytan) kylts till ca 64°C under de 10 sekunder som förflöt utanför fritösen före snittningen, och att temperaturen påverkats ca 4 mm in i produkten. Centrumtemperaturförloppet kan dock inte påverkas under denna korta tid.

I nästa figur har resultatet korrigerats för "ytfelet" och en matematisk modell är streckad i botten. Metoden är användbar, men utrustningen så dyrbar att det bara vid mycket speciella tillfällen är möjligt att tillämpa metoden.



The continuous line: Temperature distribution in a meat ball. Oil temperature 160°C . The curves are corrected for surface cooling. Broken lines: the temperature distribution according to a mathematical model (30 seconds between each curve)

4.2. Fysikaliska data.

Vid framtagning av en matematisk modell för stekning måste man ha noggranna värden på de värmefysikaliska storheterna, d v s värmeledningstal och värmekapacitet. Mycket få undersökningar finns rapporterade i litteraturen. Ofta är överensstämmelsen mellan olika mätningar dålig. Problemet är att

livsmedelsråvarans sammansättning varierar och är svår att definiera ordentligt. Dessutom används ett stort antal olika mätmetoder som introducerar större eller mindre mätfel. Mest litteraturunderlag finns för helt kött och fisk.

Därför utprovades två snabbmetoder för bestämning av specifikt värme (c_p) och temperaturledningstal (α) för köttfärs. Dessa är beskrivna i delpublikation III.

För bestämning av värmekapacitet användes en modifierad form av differential-scanning-calorimetri. Normalt mätes värmekapacitet med denna metod genom att registrera skillnaden mellan värmetillförsel till två kapslar, varav den ena innehåller provet och den andra är tom. Kapslarnas temperatur styrs hela tiden så att de är lika och ökar linjärt med tiden. Denna metod har dålig noggrannhet därför att vissa värmeförluster inte kan kontrolleras. Vid den förbättrade metoden mättes istället skillnaden i värmetillförseln då provet var under uppvärmning och då provet låg vid konstant temperatur. Mätdata erhöles för sex olika recept och fem olika temperaturer. En multipelregressionsanalys gjordes utgående från en modell, som förutsatte linjär sammansättning av de ingående komponenternas (vatten, fett, torrs substans) värmekapaciteter. Därmed erhöles en formel för värmekapaciteten som funktion av temperatur, vattenhalt och fetthalt.

En metod för att mäta temperaturledningsförmåga i köttfärs utvecklades på SIK i Göteborg. Denna metod, som också är beskriven i III, grundar sig på jämförelse mellan experimentella temperaturdata och ett simuleringsprogram för värmning av en köttfärsskiva mellan två temperaturstyrda metallplattor. Resultaten från denna metod behandlades också med regressionsanalys. Genom att härleda en formel för täthetens variation med temperatur, vattenhalt och fetthalt, kunde värmeledningstalet erhållas som funktion av samma parametrar.

En sammanställning av de erhållna sambanden för beräkning av värmetekniska data för köttfärs som funktion av vattenhalt (w), fetthalt (f) och temperatur (t) har gjorts nedan:

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda = 0.50 - 0.92 \cdot f + 0.0024 \cdot t \quad \text{W/m, } ^\circ\text{C} \\ \rho = 1300 - 300 \cdot w - 400 \cdot f - (0.4 \cdot w + 0.7 \cdot f) \cdot t \quad \text{kg/m}^3 \\ c_p = 1600 + 2600 \cdot w + 15 \cdot t \cdot f \quad \text{J/kg, } ^\circ\text{C} \\ a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \end{array} \right.$$

Beteckningar:

λ	= värmeledningstal	W/m ^{°C}
ρ	= täthet	kg/m ³
c_p	= värmekapacitet	J/kg ^{°C}
f	= fetthalt	kg/kg
w	= vattenhalt	kg/kg
t	= temperatur	°C
a	= temperaturledningstal	m ² /s

För att ekvationerna skall vara giltiga gäller att torrsubstanshalten bör ligga i intervallet 20-30%, vilket är fallet i de flesta färsprodukter.

4.3. Jämförelse mellan stekmetoder.

Målet med stekning är att uppnå tillräckligt hög centrumtemperatur samtidigt som en stekskorpa bildas på produkten. Fyra stekmetoder, som var och en ensam kan åstadkomma detta, har jämförts med avseende på stektid, viktsförlust, ytans mörkfärgning m m (IV). Stekmetoderna var fritering, kontaktstekning (d v s stekning mellan två varma plattor, infra-stekning (värmestrålning) och konvektionsstekning (d v s stekning i het luft av hög hastighet. En jämförelse mellan de fyra metoderna med avseende på sensorisk kvalitet gjordes också (V).

I litteraturen finns mycket få jämförande undersökningar beskrivna. Visser et al (1960) /52/ studerade mörhet och saftighet hos nötkött vid ugnstekning i jämförelse med fritering. Erforderlig stektid vid ugnstekning blev därvid två-tre gånger längre än vid fritering. McCrea och Paul (1974) /31/ fann att ugnstekning och fritering medförde mindre ned-

brytning av bindvävnaden än den snabbare mikrovågsvärmningen och den betydligt långsammare grillningen. För ett kommersiellt pannbiff-recept studerade Bengtsson och Jakobsson (1974) /6/ olika kombinationer av konventionella stekmetoder och mikrovågsvärmning i jämförelse med enbart stekning och konventionell teknik. I ett arbete av Hallström och Sörenfors (1975) /17/ redogörs för de principiella skillnaderna mellan de olika stekmetoderna. Stekprocessen kan ur tid/temperatur-förloppssynpunkt indelas i tre olika perioder: uppstartnings-förloppet till dess yttemperaturen uppnår 100°C , det egentliga stekförloppet, när ytans temperatur är över 100°C , och till slut efterstekningsförloppet, som fortskrider till dess centrum-temperaturen har nått sitt maximala värde. Skillnader mellan stekmetoderna i detta avseende kan förklaras rent teknologiskt genom skillnader i aktuellt värmeöverföringstal.

Av de i publikation IV och V genomförda undersökningarna gjordes IR- och kontaktstekning (eg. dubbelhäll) vid SIK i Göteborg, medan fritering och konvektionsstekning gjordes vid Livsmedelsteknik i Alnarp. Samma köttfärspartier användes på båda ställena. Två olika recept användes, det ena med god vattenhållning, det andra med dålig. Färsen formades till burgare med 1 cm tjocklek. Stekapparaturen var i laboratorieskala och av egen konstruktion.

Försöken lades upp på följande sätt:

För varje stekmetod valdes fyra stekeffekter för att möjliggöra optimering inom metoderna. Valet av stekeffekter är beroende av det aktuella området för metoden ifråga. Genom förförsök utvaldes stekeffekterna så att det praktiskt användbara området var täckt för varje metod.

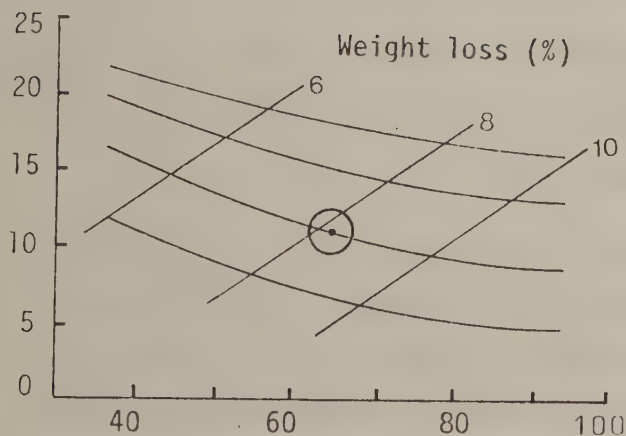
<u>Metod</u>	<u>Stekvariabel</u>	<u>Stekeffekt</u>
Fritering	Fettemp.	130, 150, 170 och 190°C
Dubbelhäll	Hälltemp.	150, 170, 190 och 210°C
IR	Effekt	15, 18, 21 och 25 kW/m^2
Konvektion	Lufttemp.	200, 250, 300 och 350°C

Vid konvektionsstekningen var luftfuktigheten 0% RH och luft-hastigheten 10 m/s. Den ovan angivna IR-effekten är den vid bandet uppmätta.

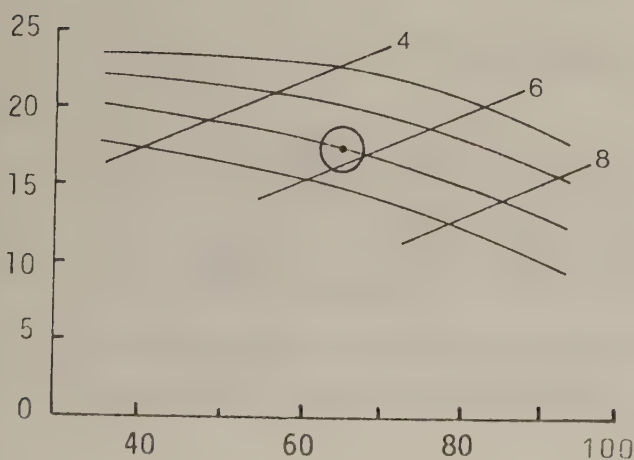
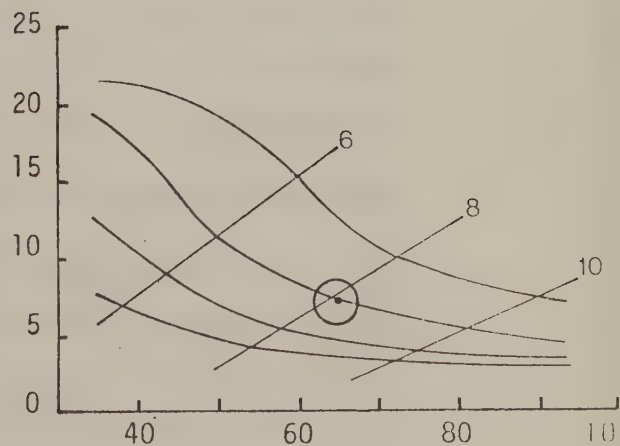
Försöken var planerade i tre steg:

- 1) Först studerades stektid, stekförluster och stekytans ljushet vid stekning till 6 olika centrumtemperaturer från 40 till 90°C. Detta gjordes för 4 stekmetoder x 4 stekeffekter x 2 recept.
- 2) Därefter undersöktes sensorisk kvalitet, utbyte, textur och ljushet vid s k färdigstekning (def. här som stekning till 65°C centrumtemperatur). En optimal stekeffekt kunde här efter uttagas för varje stekmetod och recept.
- 3) Slutligen gjordes sensorisk analys av burgare, "färdigstekta" vid optimal stekeffekt, samtidigt för de fyra stekmetoderna.

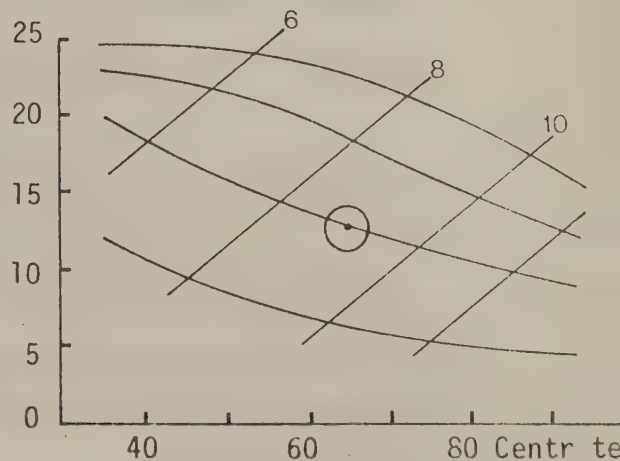
Brightness (%)



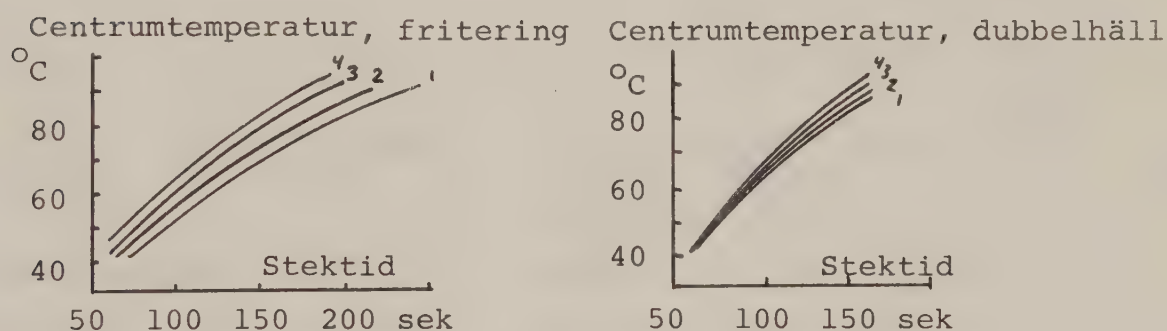
— ZETRA



COCKE-ON



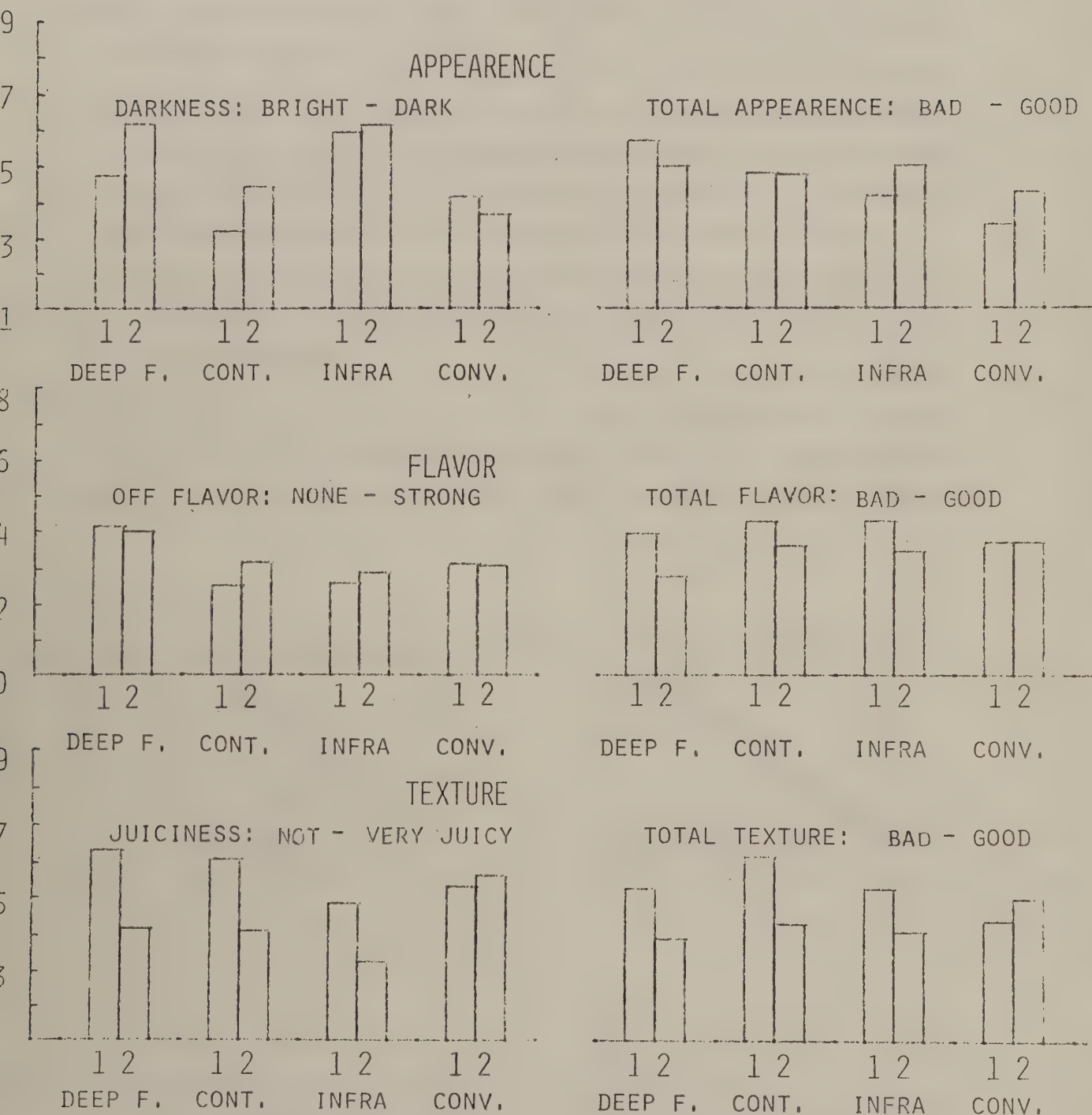
Undersökningen resulterade primärt i samband mellan stektid, centrumtemperatur, ljushet och viktsförlust för respektive recept och stekmetod. I diagrammen på föregående sida har resultat för det bra vattenhållande receptet vid s k färdigstekning uppritats. De fyra "omärkta" kurvorna motsvarar respektive "stekeffekt" med högst värde på den understa kurvan i varje skara. Cirklarna markerar det optimala värde, som uttogs för den slutliga sensoriska jämförelsen. Det framgår bl a att kontaktstekning har lägre viktsförlust (6%) och konvektionsstekning högre (9%) än de båda övriga (8%). Ljusheten blir genomgående högre med kontaktstekning, medan IR-stekning ger förhållandevis låga värden. Även om man i en stekprocess har andra parametrar, kan diagrammen vara till hjälp då man vill studera samspelet mellan centrumtemperatur, ljushet och viktsförlust. En intressant iakttagelse är den principiella skillnaden mellan kontaktstekning och övriga metoder, t ex fritering. Som framgår av nedanstående figurer



har stekeffekten (hälltemperaturen) vid kontaktstekning mycket liten betydelse för centrumtemperaturen. Kurvorna 1 till 4 motsvarar lägsta till högsta stekeffekt.

Den sensoriska undersökningen grundades på 20 bedömares utlåtanden. De smakade på och betraktade samtidigt biffar från var och en av de fyra stekmetoderna, varefter poängtal (9-gradig skala) åsattes sex olika egenskaper.

Medelvärden är presenterade nedan:
(1 och betecknar de båda recepten.)



En statistisk behandling med hjälp av Scheffe's metod gav bl a följande slutsatser:

Färg: Fritering och IR gav mörkare produkter än häll och konvektion. Skillnaden var 2 poäng

Utseende: Fritering gav bättre utseende än konvektion

Bismak: Fritering hade mer bismak än de övriga

Smak: Ingen signifikant smakskillnad kunde spåras

Saftighet: Speciellt för recept 2 gav IR mindre saftighet än konvektion

Konsistens: Ingen signifikant konsistensskillnad kunde spåras.

Dessutom kunde stora skillnader konstateras mellan recepten. Sammanfattningsvis visar den sensoriska undersökningen att för de provade produkterna är de fyra metoderna ungefär likvärdiga, förutsatt att man använder optimal stekeffekt och rätt stektid. För konvektionsstekning betyder detta t ex att det, för tunnare produkter i likhet med stekburgare, krävs ugnar som kan användas vid temperaturer över 300°C och med lufthastigheter omkring 10 m/s.

Ur utseendesynpunkt skiljer sig framför allt hällstekning från de övriga metoderna genom den typsikt "fläckiga" stekytan. IR- och konvektionsstekning medför relativt likartade stekytor även om en viss kantövervärmning erhålles med konvektionsmetoden. Fritering ger den jämnaste stekytan. För fritering erhöles kraftigare bismak, men ej signifikant sämre smak än för de övriga metoderna. Det har sagts om fritering att produkterna tar smak av stekfettet och att det är en nackdel. Det första visade sig alltså rätt, men att det skulle vara en nackdel kunde inte konstateras. Förklaringen beror nog till stor del på att friteringsförsöken har skett med nytt fett. Under realistiska friteringsförhållanden kan fettkvaliteten inte hållas på denna höga nivå.

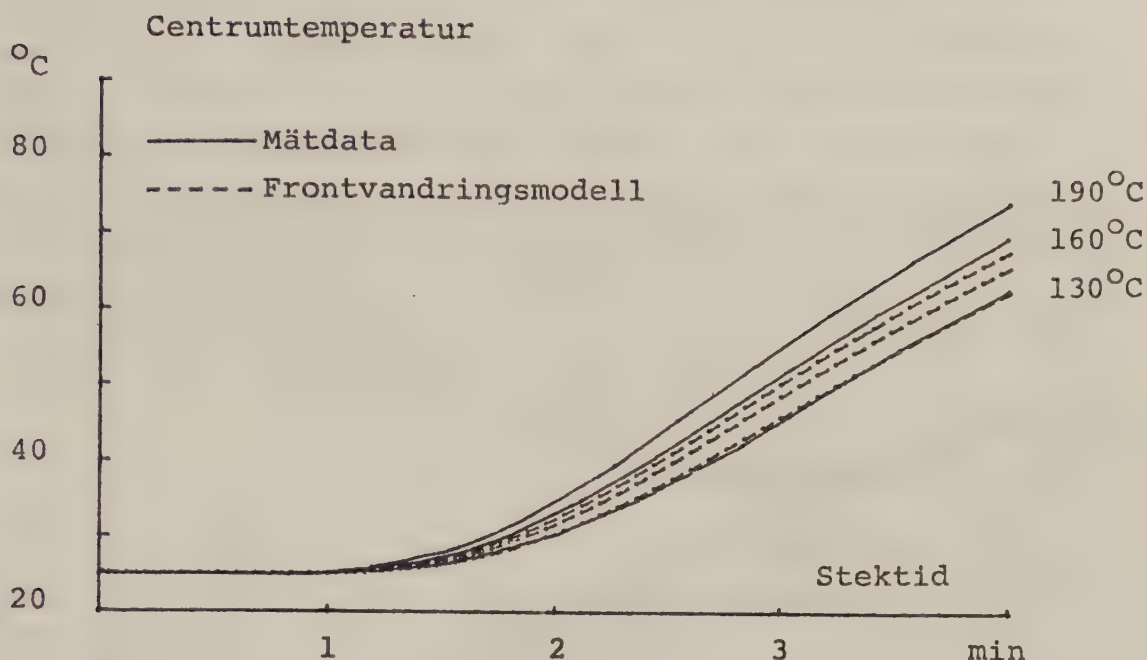
5. Matematiska modeller.

I den mån man hos industrin har använt matematiska modeller för beräkning av stekförlopp, har dessa varit av mycket enkel natur. T ex ren värmeledning i fast kropp, vilket inte gav möjlighet att studera mycket annat än centrumtemperaturens beroende av produkt tjocklek. Viktsförlust och ljushet har inte kunnat simuleras och inte heller inverkan av olika frityrbads- eller hålltemperaturer. Inga arbeten på stekmodeller har publicerats tidigare. Inom angränsande områden såsom bakning finns dock några arbeten t ex Housova (1977) /20/, som använder Lykovs teorier /28/ för porösa material.

Publikation VI behandlar mekanismer för värme- och masstransport i färsprodukter. Olika modeller simuleras och jämföres med experimentella resultat.

Det finns vid stekning förutsättningar för många okonventionella mekanismer för värme- och masstransport. Vid fritering av köttbullar konstaterades att tätheten sjönk 10% beroende på svällning. Någonstans i produkten måste därför porositeten vara minst 10%. Vid så hög porositet finns förutsättning för värmetransport genom att vatten förflyttar sig under avgivande av kondensationsvärme.

Den första matematiska modell för fritering som provades var följande: Värme transporteras via ett värmeöverföringstal till produktens yta. En del av värmen leds in i produkten, medan resterande värme används för att avdunsta vatten, varvid stekskorpa bildas. Vattenförlusten motsvaras alltså av det vatten som fanns i den växande stekskorpan. Fysikaliska data ansattes temperaturberoende /III/. I figuren överst på nästa sida visas att överensstämmelsen mellan denna modell och experimentella mätningar m a p centrumtemperaturen, inte är särskilt bra. Framför allt inverkar frityrbadtemperaturen inte tillräckligt mycket på centrumtemperaturen.



Det framgår av figuren ovan att vi behöver införa någon mekanism i modellen som tillåter att omgivningstemperaturen påverkar centrumtemperaturen. Detta kan ske på fyra principiellt olika sätt:

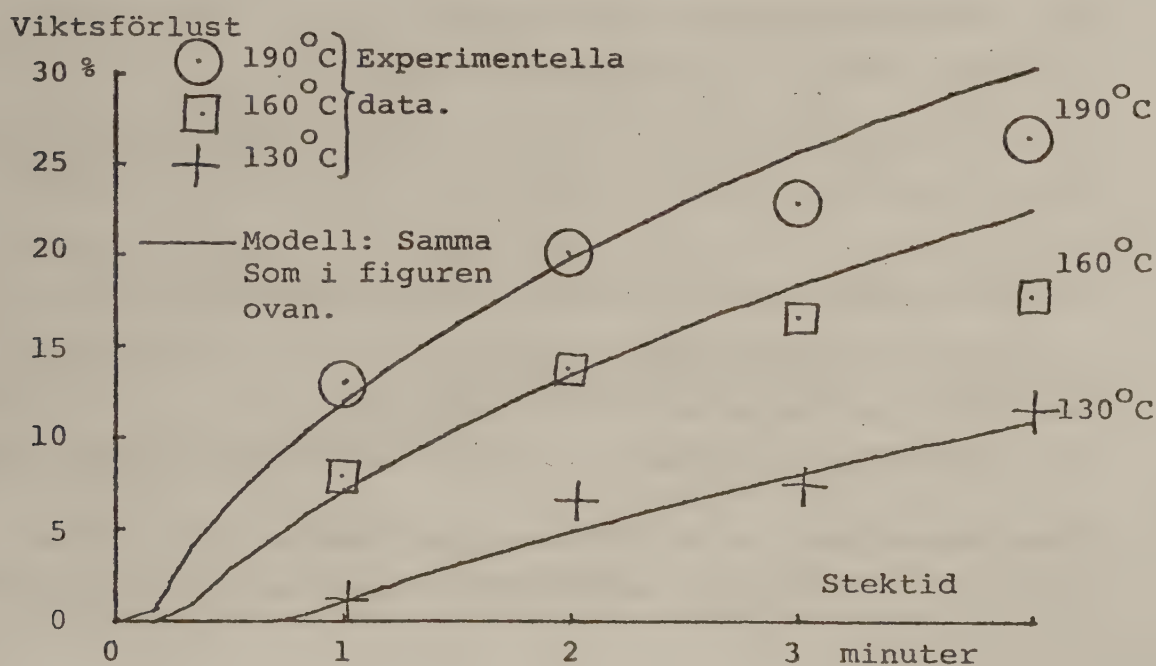
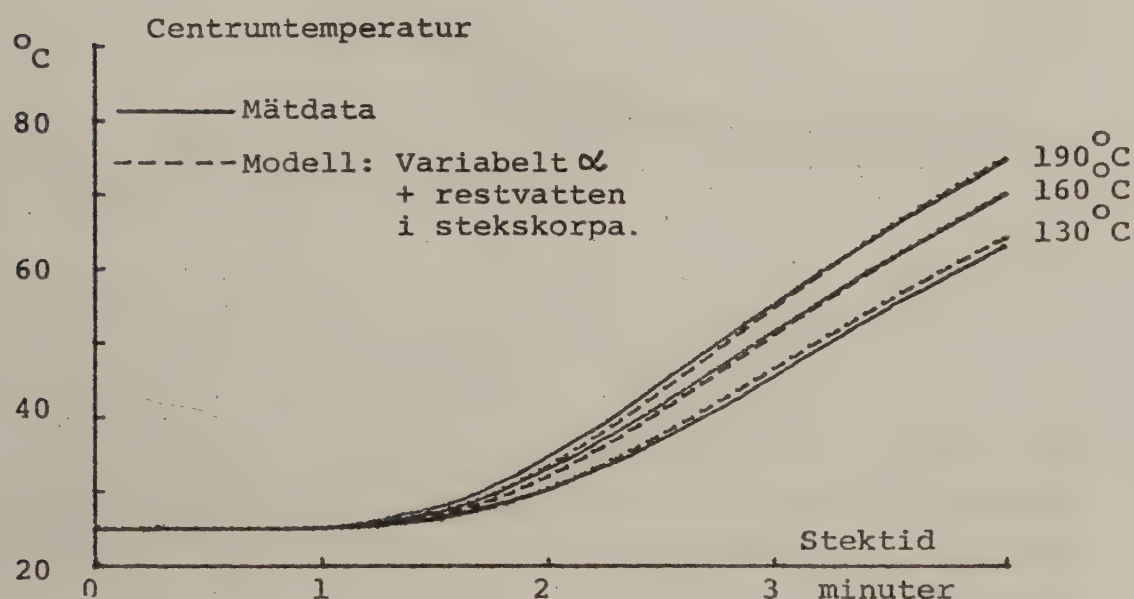
- a) Värmestrålning genom köttfärsen.
- b) Ångtransport och kondensation längre in.
- c) Skenbar värmeledning genom termodiffussion.
- d) Olika mekanismer som bidrar till att kokpunktsisotermen förflyttas snabbare inåt.

Den sista punkten kan omfatta följande mekanismer:

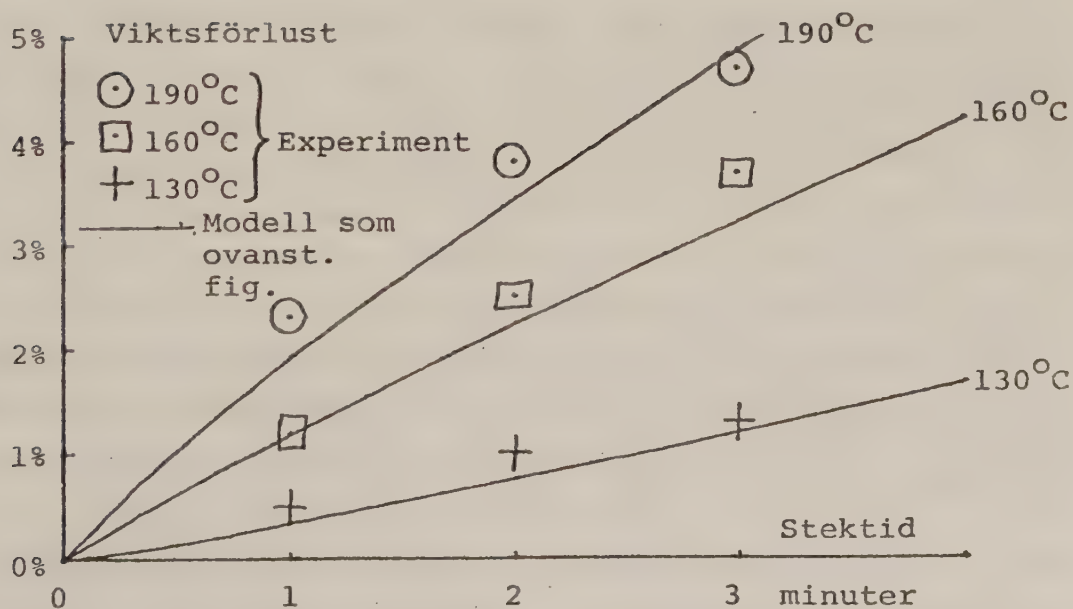
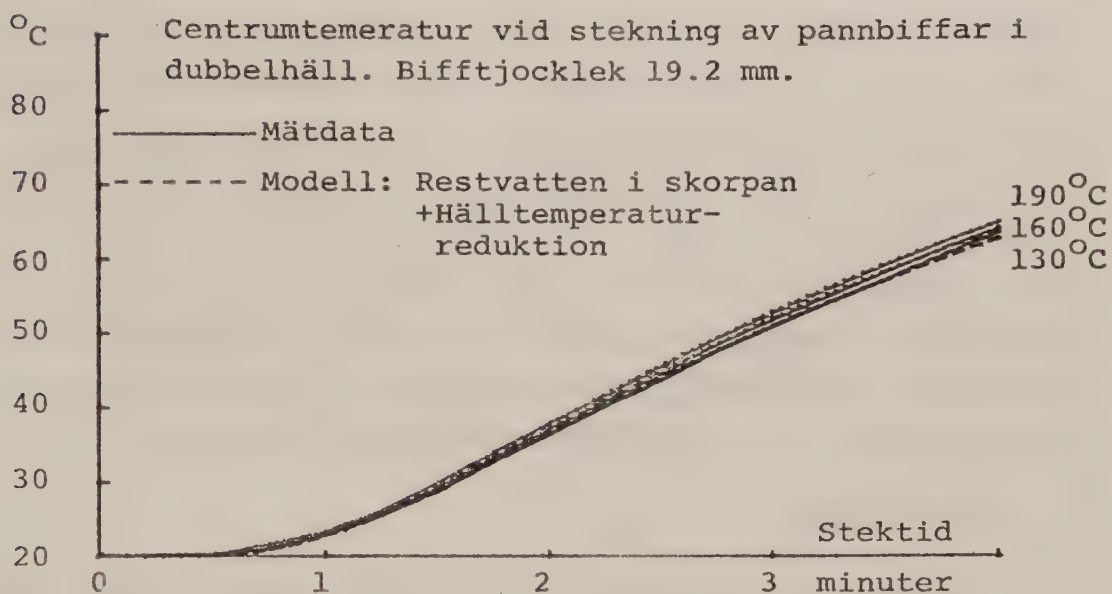
- d1) Kokpunktsförhöjning i kokzonen.
- d2) Stor restvattenhalt i stekskorpan.
- d3) Värmeöverföringstalet varierar starkt under stekningen.

Dessa mekanismer har diskuterats med hänsyn till utförda experiment, teoretiska undersökningar och datorsimuleringar.

Sålunda kunde princip a, b och c vederläggas. Mot b t.ex. talade både experimentella undersökningar angående inre vattenförflyttning och simuleringar med datorprogram /VII/ innehållande modellen i fråga. Modell d2 och d3 visade sig båda vid simuleringar ge en mycket god överensstämmelse med experimentella temperaturkurvor. Däremot gav modell d2 för låga viktsförluster medan modell d3 gav för höga. En modell där d2 och d3 kombinerades gav följande anpassning till experimentella mätningar vid köttbullsfritering.



Vid stekning av pannbiffar i dubbelhäll erhöjls följande anpassning:



Restvattenmodellen innebär att en viss temperaturberoende andel av vattnet, som skulle ha avdunstat, hålles kvar i stekskorpan, trots att temperaturen där överstiger 100°C .

Modellen med variabelt värmeöverföringstal, α , grundar sig på att α ökar kraftigt (och beroende av ångflödet) från uppmätta cirka $300 \text{ W/m}^2, ^{\circ}\text{C}$ i början (egenkonvektion) till cirka $800 \text{ W/m}^2, ^{\circ}\text{C}$ då kokningen från produktens yta sätter in.

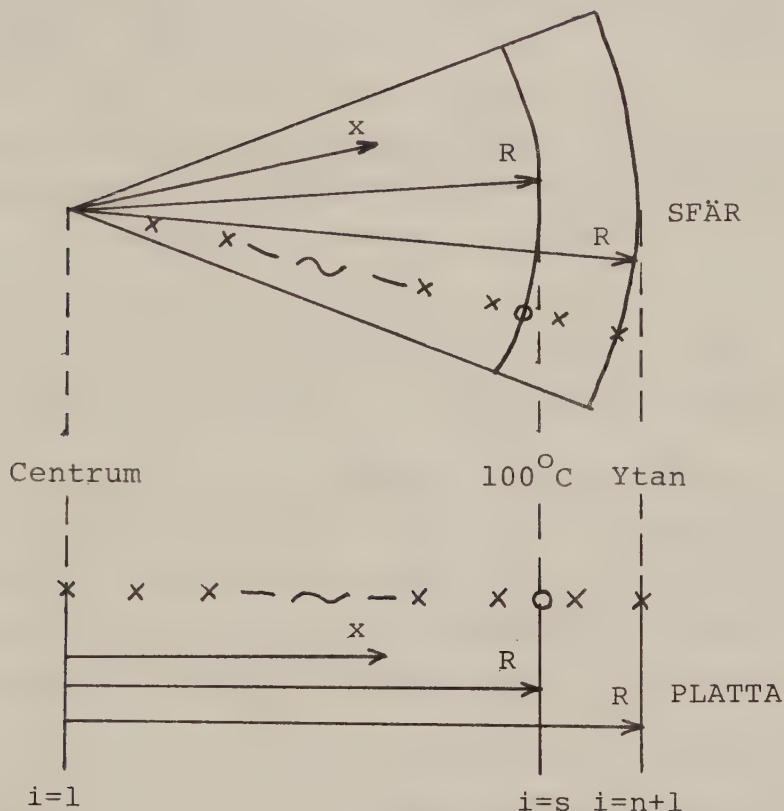
Vid stekning av biffar i dubbelhäll antas inte denna senare mekanism förekomma. Istället antas fullständig kontakt föreligga mellan en viss del av biffytan (topparna) och hällen, medan resterande del av ytan (dalarna) genom ångavgången antas få en konstant temperatur på 100°C . Detta simuleras förenklat i programmet /VII/ genom att hälltemperaturen reduceras med en term som är beroende av ångflödet.

6. Datorprogram.

Vid alla nämnda simuleringar användes ett datorprogram som är beskrivet i delpublikation VII. Programmet är avsett att köras i dialogform från terminal och är därför försett med en kommandostruktur som gör det lätt att kommunicera med datorn. Beräkningsarbetet kan t ex styras med kommandon så att programmet stoppas då vissa villkor är uppfyllda. Man har sedan möjlighet att titta på resultat och ändra parametrar (t ex byta stekmetod) och sedan fortsätta steka igen där man avbröt. Utmatning av resultat kan ske på flera sätt bl a direkt uppritning på XY-plotter eller som tabeller via radskrivare. Exempel på resultat är centrumtemperatur, viktsförlust, ytljushet och energiåtgång. Allt som funktion av tiden. Programmet är egentligen framtaget just för att testa olika matematiska modeller, varför det kan sägas vara överdimensionerat för vanliga enkla stekningar. Men detta hindrar inte att det kan användas i denna form både för projektering och drift av steklinjer.

Eftersom modellen är för komplicerad för att ha en exakt matematisk lösning användes en numerisk metod, den s k finita differensmetoden, vilken är den allra vanligaste och enklaste metoden för instationär värmetransport.

Både i fallet sfär och platta erhålles ett tvådimensionellt problem där en x-koordinat utgör den ena och tiden den andra dimensionen. Produkten (sfär eller platta) indelas i n st delar från centrum till ytan. Dessutom lägges en extra punkt på den rörliga 100°C -isotermen.



Programmet är skrivet i FORTRAN V och har förstärkts med ett femtontal egna subrutiner skrivna i ASSEMBLER.

Kommandostrukturen är så allmänt skriven att den kan användas i helt andra dialogprogram. Man arbetar i två olika "mode": "ASSIGN-mode" och "LOOP-mode". I första fallet kan 9 olika kommandon skrivas på terminalen, t ex: READ, SET, FRY, ASK, OUT etc. Varje kommando bör följas av flera ord enligt en

definierad syntax. På så sätt styrs verksamheten i programmet. Varje gång datorn räknat eller ritat färdigt enligt föregående kommandorad kan en ny kommandorad skrivas.

Med "LOOP-mode" kan man bl a ange kommandorader med repetitionsfunktion så att programmet automatiskt utför t ex stekning för ett visst antal olika värmeöverföringstal eller recept etc. Övergång mellan olika "mode" utföres med blankradinmatning. Nedanstående exempel visar en mycket enkel komplett körning där tre biffar av olika tjocklek kontaktstekes vid fyra olika hålltemperaturer. Bakom "READ 6" döljer sig inmatning av ett helt datablock från en minnesfil. Det som står efter "större-än-tecknen" är sådant som man matat in vid terminalen.

```
>@FRY
```

```
FRYING          VERS. 780823 15.35
*****
```

```
ASG*>READ 6
```

```
NUMBER OF READ LINES WAS 4
```

```
ASG*>
```

```
LP**>DO THICK .01 .012 .015
```

```
LP**>DO TEMP 150 170 190 210
```

```
LP**>BEGIN
```

```
LP**>FRY
```

```
LP**>OUT SAVE
```

```
LP**>GO
```

```
ASG*>OUT TABLE ALL
```

```
ASG*>EXIT
```

```
>
```

Det bör också noteras att alla kommandon kan skrivas med bara första bokstaven så att t ex "OUT HPLOT CTEMP ALL" kan skrivas: " O H C A".

7. Arbetets praktiska nytta.

De viktigaste resultaten har eller kommer att publiceras i bredare och mer lättillgänglig form.

Detta arbete utgöres grovt sett av två delar, en grundläggande del, på gränsen till grundforskning och en tillämpad del. Här kan delpublikationerna I-V karaktäriseras som grundläggande och VI och VII som tillämpad forskning. För grundläggande forskning är det ofta svårt att ange någon direkt praktisk nytta.

Resultaten från termoelementsimuleringarna /I/ är emellertid presenterade i lättillgänglig form av typen goda råd, vilket kan ge omedelbar förbättrad mätteknik.

Temperaturmätning med Thermovision /II/ har ingen större möjlighet att vinna tillämpning vid stekning. Men stort intresse har visats från andra forskningsfält.

De formler för fysikaliska data för köttfärs, som togs fram i delpublikation III, kommer att få betydelse och användes redan i andra datorprogram. De nya analysmetoderna kommer också att i fortsättningen användas vid SIK och Alnarp i samband med ett brett upplagt europeiskt samarbetsprojekt (COST).

Den jämförande studien mellan fyra stekmetoder /IV, V/ ökar förståelsen för de grundläggande sambanden på det stektekniska området. Delar av diagrammaterialet kan direkt användas för beräkningar på den egna stekprocessen.

Det viktigaste och mest påtagliga resultatet av detta arbete är datorprogrammet /VI, VII/ för att simulera stekning. Det är särskilt två typer av simuleringar som är intressanta. Dels simulering av en steklinje, bestående av två eller flera steg i serie (eller parallellt). Det är användbart vid projektering av nya anläggningar, då man vill fördela stektiden och effekten optimalt för de olika delstegen. Den andra intressanta typen av simuleringar är optimering av befintliga steklinjer. Det kan t ex gälla att ta reda på vilka korrekationer som behöver göras för bandhastighet och fett-temperatur när produktens ingående smettemperatur ändras.

Slutligen kan nämnas att den matematiska modellen är utvecklingsbar till andra typer av produkter. Även en del av de för färsprodukter vederlagda mekanismerna för värmetransport kan komma ifråga vid andra processer t ex bakning och torkning.

8. Referenser.

1. Andersson, Y., SIK-rapport, 376 (1975).
2. Ball & Olsson, 1957. Sterilization in Food Technology. Mc Graw-Hill Book Co, New York.
3. Bankvall, C. Natural convective heat transfer in insulation structures. Division of building techn., Lund inst of techn, Lund, Sweden, 1972.
4. Bankvall, C. Värmetransport i fibrösa material. Inst. för byggnadsteknik, LTH, Lund 1970.
5. Bengtsson, N.E., Lycke, E. J. of Microwave Power, 4, 2 (1969).
6. Bengtsson, N.E., Jakobsson, B. Microwave Energy Applications Newsletter, 7 (1974):6, p 3.
7. Boelter, L.M.K. et al. Equations for steady-state temperature distribution caused by thermal sources in flat plates applied to calculation of thermocouple errors, heat-meter corrections and heat transfer by Pin-fin plates. National advisory committee for aeronautics (NACA). Technical note 1452, 1944.
8. Boelter, L.M.K. et al. Thermocouple conduction error observed in measuring surface temperatures. National advisory committee for aeronautics (NACA). Technical note 2427.
9. Bomberg, M. Moisture flow through porous building materials. Div. of Building techn., Lund inst of techn., Lund 1974.
10. Causey, K., Andreassen, E.G., Hausrath, M.E., Along, C., Ramstad, P. and Fenton, F. Food Research 15, 237 (1950).
11. Carslaw, H.S., Jaeger, J.C. Conduction of heat in solids. Oxford University Press, London 1959.
12. Dagerskog, M., Bengtsson, N.E. Lebensmittel-Wissenschaft und Technology 7, 202 (1974).
13. Dagerskog, M., Bengtsson, N. Pan frying of meat patties. Relationship among crust formation, yield, composition and processing conditions. Lebensmittel-Wissenschaft und Technology 7, 202 (1974).
14. Dagerskog, M. Stekning av livsmedel. Doktorsavhandling, Göteborg 1978.
15. Dagerskog, M., Engwall, P. Utveckling av en kontroll- och styrenhet för processtemperatur vid matberedningsförsök vid SIK. SIK:s Service-Serie Nr 432 (1973).
16. Dickerson, R.W. An apparatus for the measurement of thermal diffusivity of foods. Food Technology 19, 5, 198 (1965).

17. Hallström, B., Sörenfors, P., Fleisch 29, 185 (1975).
18. Hayakawa, K., Bahal, A. New computational procedure for determining the apparent thermal diffusivity of a solid body approximated within infinite slab. J. Food Science 38, 623 (1973).
19. Hostetler, R.L. et al. Effect of thermocouple wire size on the cooking times of meat samples. J. Food Science 42, 846 (1977).
20. Housova, J. The baking process - mathematical model of heat and mass transfer. EFCE minisymposium: Mathematical modelling in food processing, Sept 7-9, Örenäs, Sweden.
21. Jakob, M. "Heat Transfer", Part G, Chapter 33 (1957).
22. Katayama, K., Okada, M., Yoshida, T. A new method of simultaneous measurement of several thermal properties by continuous heating. Heat Transfer-Japanese Research 1, 1, 23 (1972).
23. Kerber, R. et al. Wärmeleitung in Zwei-Phasen-Systemen fest/flüssig. Chem. Ing. Techn. 40, 1176-1180 (1968).
24. Krischer, O. Die wissenschaftliche Grundlagen der Trocknungstechnik. Berlin 1963.
25. Krischer, O. et al. Wärmeleitung und Dampfdiffusion in feuchten Gütern. VDI-Forschungsheft 402, VDI-Verlag GMBH, Berlin 1940.
26. Leyers, H.J. Wärmeleitung von Losen Kugelschüttungen in stagnierenden Medien. Chemie Techn. 44, 1109-1115 (1972).
27. Lykov, A.V. Heat and mass transfer in capillary-porous bodies. London 1966.
28. Lykov, A.V. Systems of differential equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies (Review). Int. J. of Heat and Mass Transfer, 18, 1-14 (1975).
29. Lykov, A.V. et al. Theoretical investigation of vapour transfer through a capillary-porous body. Int. J. of Heat and Mass Transfer, 17, 961-970 (1974).
30. Matthews, F.V. Thermal diffusivity of finite differences and correlations with physical properties of heat treated potatoes. Ph.D. Thesis, Michigan State University, East Lansing (1966).
31. Mc Crea, S.E., Paul, P.C. J. of Food Science 39 (1974).
32. Milne, W.E. Numerical solution of differential equations, kapitel 8, New York 1970.
33. Mitchell, A.R. Computational methods in partial differential equations, kapitel 2, London 1969.
34. Moore, N.R. Thermally induced transport phenomena in partially saturated porous media. Heat Transfer Conference, Tokyo 1974, CT3.6.

35. Packer, G.J.K. et al. Calculation of temperature measurement errors in thermo-couples in convection heating cans. *J. Food Science* 39, 739 (1974).
36. Perry, J.H. *Chemical Engineering Handbook*, 4th ed, sec 2, Kogakusha 1963.
37. Perry, J.H. *Chemical Engineering Handbook*, Mc Graw Hill, Tokyo, Uppl. 4, 3:70 (1963).
38. Reidy, G.A., Rippen, A.L. Methods for determining thermal conductivity in foods. *Transaction of the ASEA*, 248 (1971).
39. Riedel, L. Measurements of thermal diffusivity on food-stuffs rich in water. *Kältetechnik-Klimatisierung*, 21, 11, 315 (1969).
40. Rosenberg, D. *Methods for the numerical solution of partial differential equations*. Elsevier, New York 1969.
41. Rosenberg, D. *Methods for the numerical solution of partial differential equations*, kapitel 1-2, New York 1969.
42. Rubanik, W. et al. Effekten av korvfärsens parvisa och kemiska komponentförändringar på dess värmefysiska karaktäristika. *Mjasv. Ind. SSR*, 2, 31 (1970).
43. Skjöldebrand, Ch. *Livsmedelsteknik*, 364 (1976).
44. Smith, G.D. *Numerical solution of partial differential equations*, kapitel 1-2, London 1965.
45. Sörenfors, P., Ånäs, A. Apparatus for measuring the humidity of air above 100°C. *Laboratory Practice* 26, 549-550 (1977).
46. Sörenfors, P. Determination of the thermal conductivity of minced meat. *Lebensmittel Wissenschaft und Technology* 7, no 7 (1974).
47. Sörenfors, P. *Grundläggande arbete rörande värmebehandling av livsmedel*. STU-rapport 1974.
48. Sörenfors, P. *Proceedings of EFCE minisymposium: Mathematical Modelling in Food Processing*, Sept 7-9, Örenäs, Sweden.
49. Sörenfors, P. *SIK-Report*, 368 (1974).
50. Tschubik, I.A., Maslow, A.M. *Wärmephysikalische Konstanten von Lebensmitteln und Halbfabrikaten*. VEB Fachbuchverlag, Leipzig (1973).
51. Tye, R.P. The arts and practice of thermal conductivity measurements. *ISA Conference Proceedings Advances in test measurements*, 23, 523 (1968).
52. Visser, R.Y., Harrison, D.L., Goertz, G.E., Bunyan, M., McNelis Skelton, M., Mackintosh, D.L., *Food Technology* 193 (1960).

MÄTNING AV CENTRUMTEMPERATUR
MED TERMOELEMENT UNDER STEKNING

Alnarp 1978-09-04

Per Sörenfors
Avd för Livsmedelsteknik
Tekniska Högskolan i Lund

Innehållsförteckning.

	sid
Sammanfattning	2
Inledning	3
Mätteknik	3
Teoretiska studier av mätfelet	5
Temperaturgradientens inverkan	5
Resultat av datorsimuleringar	6
Metodik för att undvika inverkan från omgivningen	9
Simulering av verklig temperaturmätning	10
Slutsatser	12
Referenser	13

Sammanfattning.

Mätning av centrumtemperatur i stekta produkter med hjälp av termoelement förekommer ofta hos industrin. I de flesta fall tänker man inte på att termoelementmetoden alltid är behäftad med fel, som beror på att termoelementet själv leder värme in till mätpunkten. Mätfel på 5°C är vanliga. I denna rapport penetreras felets orsaker. Med hjälp av datorprogram beräknas mätfelen i avsikt att ta reda på lämpliga mätparametrar såsom tråddiametrar, placering, material etc.

Inledning.

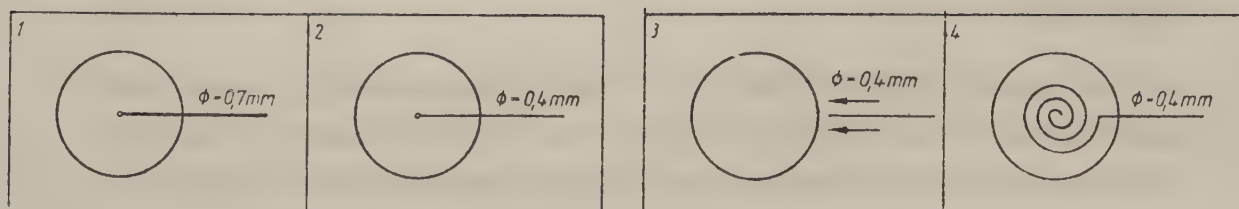
Det är sedan länge känt /1, 2/ att temperaturmätning med termoelement ger mätfel p g a att värme transporteras till (eller från) mätpunkten via termoelementtråden. Detta problem är besvärligt vid mätning av centrumtemperatur vid stekning. Särskilt svårt är det vid fritering av köttbullar. Dels ligger då termotråden i kontakt med den heta oljan, dels är avståndet till centrum så kort att köttbullens innanmäte ej hinner kyla bort den värme som leds in. Köttfärsens låga värmeledningstal relativt trådens bidrar också till denna negativa effekt. Dessutom bidrar köttbullen själv till värmeledning i metalltråden genom att temperaturgradienten är hög (ca 5000°C/m) i den omgivande färsen. Metalltråden har relativt köttfärsen så stor värmeledningsförmåga att den strävar efter att hålla mer konstant temperatur, vilket medför att trådens spets (mätpunkten) får en för hög temperatur.

Mätteknik.

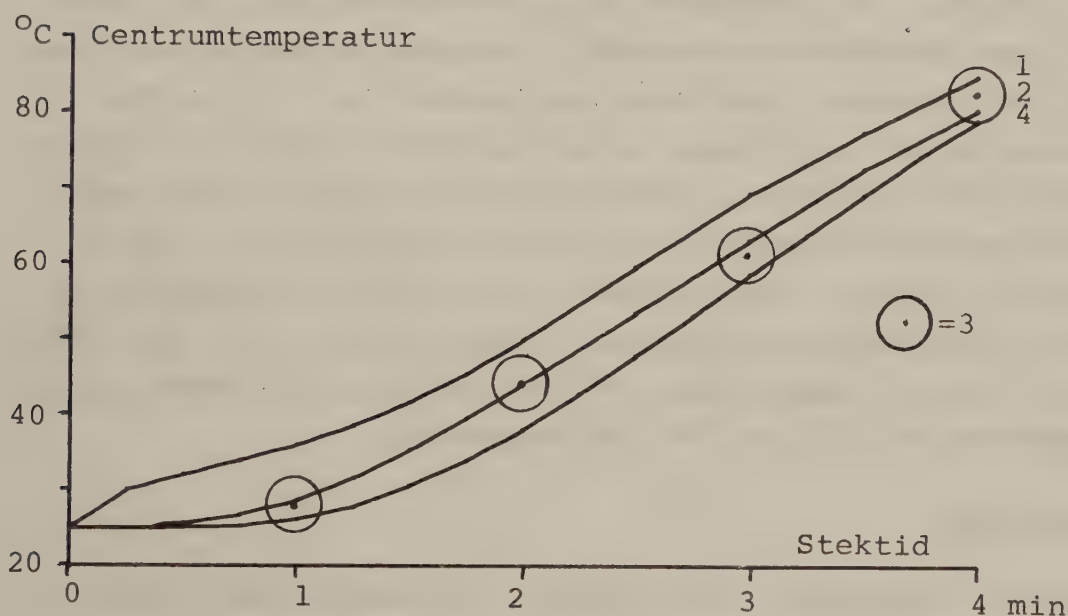
För att utvärdera olika metoder för mätning med termoelement gjordes fyra olika försök:

1. Termoelement av koppar-konstantan instuckat till centrum av en köttbulle ($\varnothing=32$ mm) som friterades. Diameter på termoelementet var 0.7 mm (inkl båda trådarna plus plastisoleringen).
2. Samma som ovan fast diametern 0.4 mm användes.
3. Termoelement ($\varnothing=0.4$ mm) sköts in efter värmningen så att avläsning kunde ske tio sekunder senare.
4. Termotråden lades som en spiral (se fig 1) inuti köttbullen.

Frityrbadets temperatur var 190°C . Resultaterande tid-temperatur-kurvor visas i figur 2. Det bör noteras att mätfelen alltid är positiva, varför man kan sluta sig till att metod fyra ger det bästa resultatet.



Figur 1.



Figur 2.

Med metod 1 stiger temperaturen redan från början. Detta är ett typiskt tecken på att ett olämpligt termoelement användes. En viss "dödtid" måste förekomma. Denna dödtid är omvänt proportionell mot värmeledningstalet hos produkten. Metod 2 ger riktigare resultat i början, men senare när stora temperaturgradienter utbildats nära centrum visar även denna metod för höga värden. Metod 3 testades för att se vilken inverkan frityrfettet har på termotråden. Bullen togs alltså upp ur badet 10 sekunder före mättid, varefter ett termoelement stacks in till centrum. På så sätt elimineras inverkan av det heta frityrfettet. Figur 2 visar att ingen nämnvärd skillnad fanns mellan metod 2 och 3. Om vi ser på kurva 4 finner vi att ytterligare noggrannhet kan uppnås genom att placera termoelementet som en spiral. Det föreslogs redan av Nusselts /2/. Anledningen till det mindre felet är att temperaturgradienten längs tråden är låg.

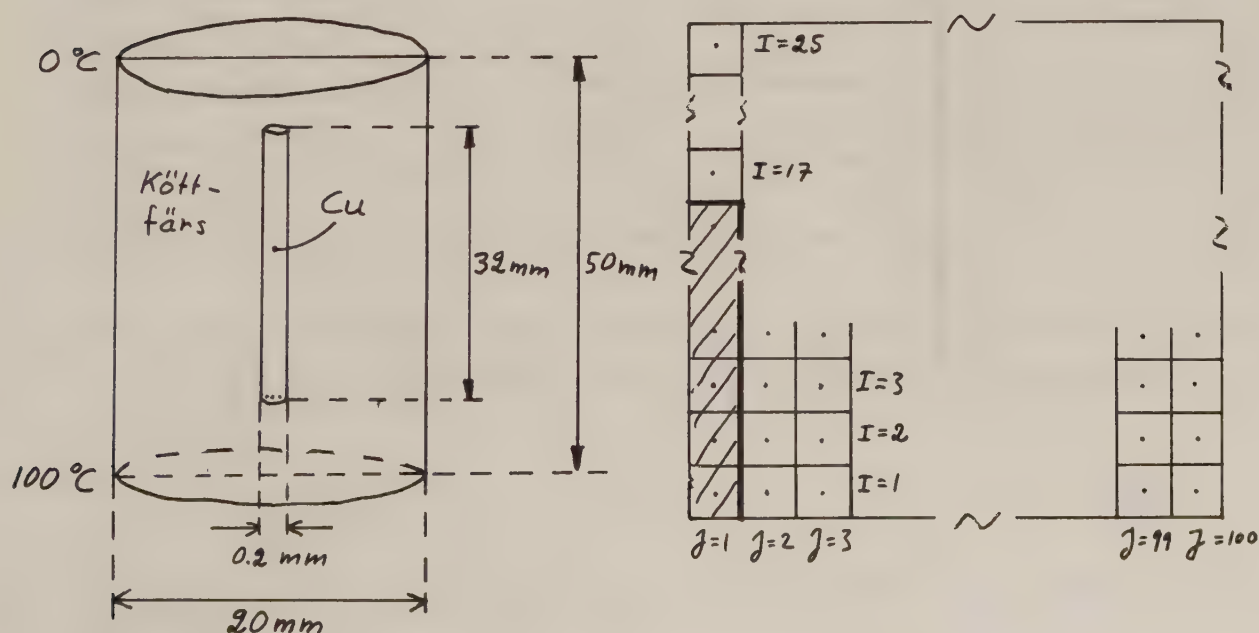
Teoretiska studier av mätfelet.

Experimentet visar

att det är framför allt temperaturgradienten i produkten och inte fettemperaturens inverkan, som ger störst bidrag till mätfelet. De flesta publikationer på området /2, 3, 4, 5/ tycks dock behandla konvektionens inverkan (d.v.s. i detta fall frityrfettets) istället för gradientens inverkan. Det beror nog på att vid köttbullsfritering är gradienten ovanligt stor och attfrityrfettet har dåligt värmeledande egenskaper i förening med låg strömningshastighet.

Temperaturgradientens inverkan.

För att studera temperaturgradientens inverkan på mätfelet gjordes ett datorprogram som simulerade en rak metalltråd som inbakats i ett oändligt köttfärsmedium med konstant temperaturgradient. För enkelhets skull antas plasthöljet på termotråden ha samma värmeledningstal som köttfärsen samt antas inga spalter med luft eller vätska förekomma längs metalltråden. Skulle dessa antaganden inte vara sanna, så påverkas resultatet ändå knappast alls. Problemet löses numeriskt med finit-element-metoden för cylindriska koordinater genom att kroppen delas in i ett antal element enligt figur 3. Varje element representeras av en punkt som ligger mitt i elementet.

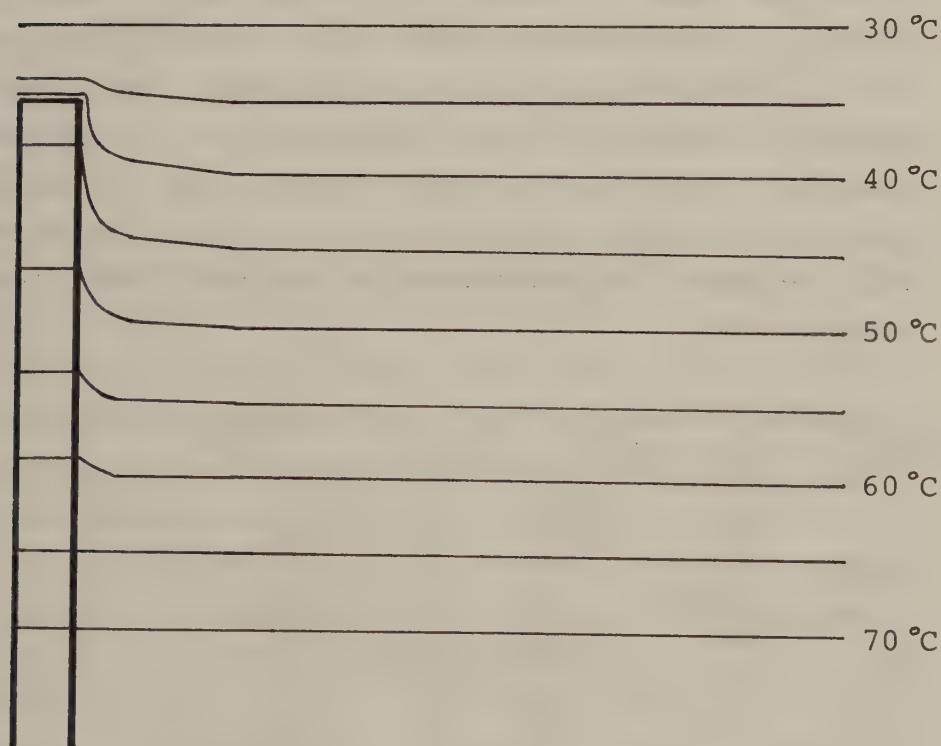


Figur 3.

P g a det stora antalet punkter radiellt kan man i praktiken betrakta lösningen till problemet som gällande för en oändlig kropp. Lösningssmetodiken skall inte närmare penetreras här. Uppställandet av ekvationer och randvillkor är detsamma som i rapporten "Steka med Dator" /6/. För lösningssmetodiken finns det gott om böcker /7, 8/.

Resultat av datorsimuleringar.

Ett exempel på temperaturfördelning kring termoelementet ses i figur 4. Det är alltså bara den absolut närmaste omgivningen som påverkas (ca 3-5 trådradier från tråden). Hostetler et. al. /1/ fann att först vid en tråddiameter på 0.5 mm kunde man se att kött hade blivit mer "vältillagat" precis intill termoelementets spets.



Figur 4.

Trådens ändpunkt motsvarar spetsen på ett termoelement. Där är också temperaturskillnaden som störst.

Efter att systematiskt kört programmet för olika förhållande mellan värmeledningstal ($F = \lambda_{\text{tråd}} / \lambda_{\text{kött}}$) och olika värden på gradienten (G) samt olika tråddiametrar (D) kunde följande tämligen noggranna formel härledas för mätfelet E:

$$E = G \cdot D \cdot (\sqrt{F} - 1) \cdot 0.64 \quad (1)$$

G är alltså gradienten i köttfärsen i trådens längdriktning.

I verkligheten har man två trådar av olika material. Då kan man /4/ beräkna en "effektiv värmeledningsförmåga" enligt:

$$\sqrt{\lambda_{\text{tråd}}} = \frac{\sqrt{\lambda_{\text{tråd 1}}} + \sqrt{\lambda_{\text{tråd 2}}}}{2} \quad (2)$$

Följande tabell ger några värden på värmeledningstal /5/:

Tabell 1.

Material	(W/m, °C)
koppar	380
järn	70
koppar-konstantan	145
chromel-alumel	25
järn-konstantan	40
plantina-rodium	45
köttfärs	0.4
luft	0.03

Eftersom två trådar löper parallellt måste en "effektiv radie" beräknas. Den effektiva radien, r_{eff} för ett termoelement är /4/:

$$r_{\text{eff}} = r \cdot \sqrt{2} \quad (3)$$

Formel 2 och 3 förutsätter att båda trådarna har samma diameter.

Av formel 1 kan man dra en del intressanta slutsatser:

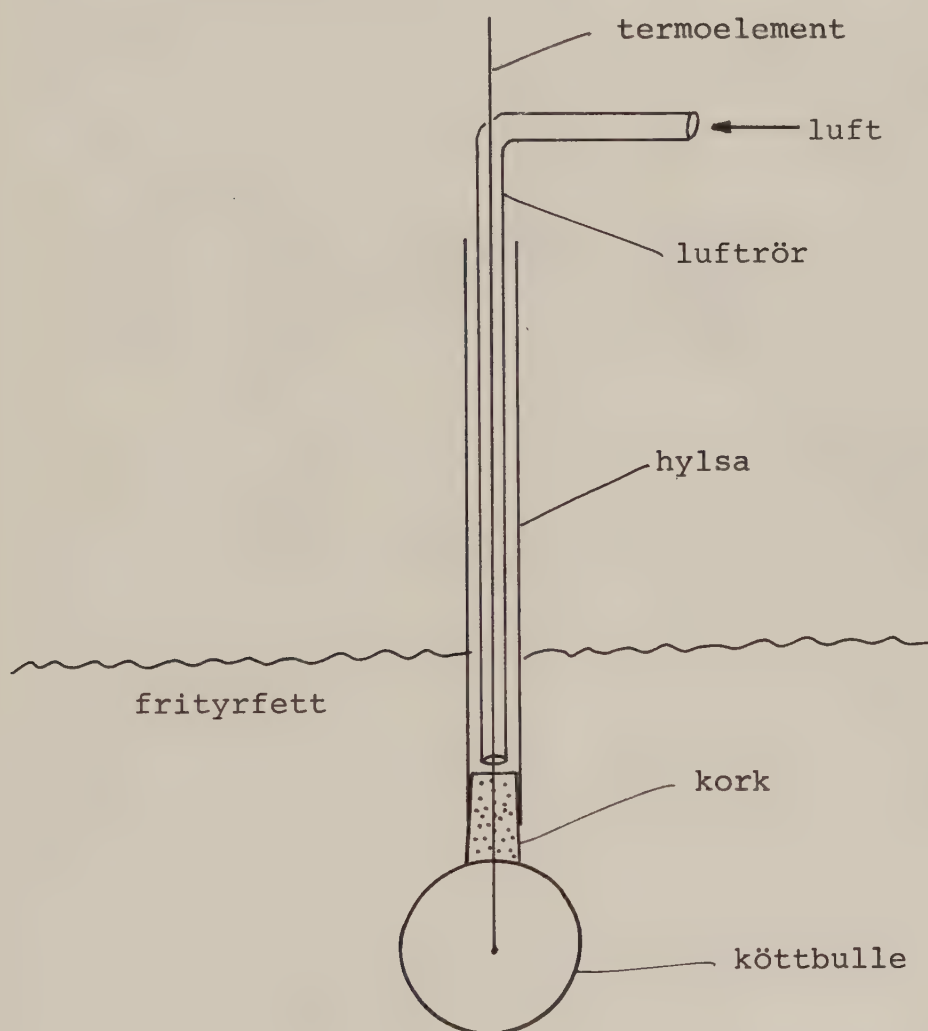
1. Mätfelet är proportionellt mot termotrådens diameter. Välj alltså tunna trådar.
2. Mätfelet är proportionellt mot temperaturgradienten. Därför bör man vid mätning på biffar placera tråden så att den följer centralplanet. D v s införes från sidan.
3. Mätfelet är beroende på vilka material som ingår i termoelementet. Om man väljer koppar-konstantan i stället för chromel-alumel blir felet 3 gånger större!

Vid normal stekning av köttbullar har man ingen konstant temperaturgradient. Dessutom är gradienten alltid noll vid spetsen på termoelementet (om spetsen ligger i centrum). Därför blir mätfelet i verkligheten mindre än med formel 1 och också svårare att beräkna. Formel 1 kan således inte användas. Där-

för gjordes en subrutin ("TEL") till det stekprogram som beskrives i en annan rapport /6/. Denna subrutin simulerar under hela stekförloppet ett i centrum instuckt termoelement. Det är i princip samma program som beskrevs ovan (figur 3) med den skillnaden att temperaturen på randen inte är linjär med avståndet, utan åsättes de under stekningen beräknade verkliga temperaturerna. Dessutom tillfogades 100 punkter i termoelementets längdriktning utanför ytan för att kunna simulera påverkan från friteringsfettet. Man kan också välja randvillkor för denna del av termotråden så att t ex en skyddande luftkyld hylsa på termotråden utanför köttbullen simuleras. Metodiken med hylsa beskrives i nästa kapitel.

Metodik för att undvika inverkan från omgivningen.

Särskilt då grövre termoelement användes är det viktigt att avskärma omgivningen under mätning. Mätfelet ökar snabbt med diameter/längd-förhållandet hos termoelementet /2/. Genom att som i figur 5 anbringa en hylsa över termoelementtråden avskärmas omgivningens temperatur till stor del. Dessutom minskas på så sätt också värmeöverförings-talet mot tråden. För noggranna mätningar har vi dessutom provat att införa en svag luftström i hylsan såsom figuren visar. Då undanträngs det friteringsfett som eventuellt läcker in i hylsan.

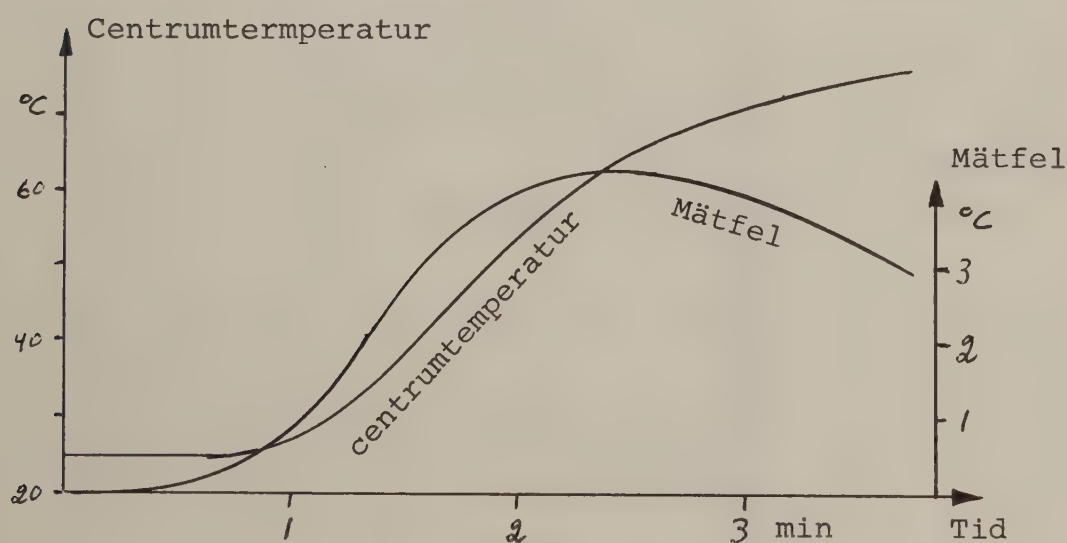


Figur 5.

Simulering av verklig temperaturmätning.

Simuleringar (med subrutinen "TEL" i stekprogrammet "FRY") gjordes med och utan hylsa samt för 3 dimensioner på termoelement av 2 slag. Simuleringarna gjordes för köttbulle med diametern 32 mm och för biff med diametern 80 mm och tjockleken 14 mm. I biffsimuleringen prövades både att lägga termoelementet uppifrån och från sidan.

Följande diagram visar i princip hur mätfelet varierar med tiden och temperaturen vid mätning med hylsa på köttbulle.



Figur 6.

Nedanstående tabell visar resultaten av nämnda simuleringar efter att centrum stigit till 32°C (begyn.temp 25°C).

Tabell 2.

mätfel ($^{\circ}\text{C}$)		med hylsa			utan hylsa		
		bulle	biff ₁	biff ₂	bulle	biff ₁	biff ₂
koppar/ konstan- tan	0.1 mm	1.3	6.8	0.0	1.3	7.7	0.0
	0.2 mm	5.6	18.2	0.0	6.1	28.6	0.0
	0.4 mm	16.2	32.5	0.1	24.4	60.3	0.3
chromel/ alumel	0.1 mm	0.4	2.3	0.0	0.4	2.3	0.0
	0.2 mm	1.8	8.1	0.0	1.8	9.3	0.0
	0.4 mm	6.8	20.1	0.0	7.4	32.1	0.0

biff₁ = termoelementet från platta sidan

biff₂ = termoelementet från periferin

Slutsatser.

Av de beräkningar och simuleringar som gjorts kan vissa rekommendationer uppställas för mätning av centrumtemperatur:

1. Använd chromel-alumel istället för koppar-konstantan. Spänningen är dessutom lättare att räkna om till grader. (Dividera antal mV med 0.041)
2. Välj en tunn tråd. Omkring 0.1 mm är bäst. Ifall tråden är mycket tunn böjer den sig under införandet, därför kan den försees med ett tunnt plaströr (kanyl). Det inverkar ej på mätningen eftersom plast har nästan samma värmeledningsförmåga som köttfärs.
3. Om möjlighet finnes bör tråden läggas så att tråden närmast spetsen ligger i så temperaturkonstant område som möjligt.
4. Avskärma omgivningen från den tråd som löper utanför produkten.

Om man följer bara några av dessa råd erhålles i regel betydligt bättre mätresultat än annars.

Referenser.

1. Hostetler, R.L. et al.
Effect of thermocouple wire size on the cooking times of meat samples.
J. Food Science, vol 42, (1977) p. 846.
2. Jakob, M.
"Heat Transfer", Part G, Chapter 33, 1957.
3. Packer, G.J.K. et al.
Calculation of temperature measurement errors in thermocouples in convection heating cans.
J. Food Science, vol 39, (1974) p. 739.
4. Boelter, L.M.K. et al.
Thermocouple conduction error observed in measuring surface temperatures.
National advisory committee for aeronautics (NACA).
Technical note 2427.
5. Boelter, L.M.K. et al.
Equations for steady-state temperature distribution caused by thermal sources in flat plates applied to calculation of thermocouple errors, heat-meter corrections and heat transfer by Pin-fin plates.
National advisory committee for aeronautics (NACA).
Technical note 1452, 1944.
6. Sörenfors, P.
Datorprogram för stekning av köttfärsprodukter,
Rapport 25 aug 1978, Livsmedelsteknik, Alnarp.
7. Milne, W.E.
Numerical solution of differential equations, kapitel 8,
New York 1970.
8. Perry, J.H.
Chemical Engineering Handbook, 4th ed, sec 2, Kogakusha
1963.

Determination of the Temperature Distribution in Deep Fat Fried Meat Balls, by Means of Heat Photography

Per Sörenfors

Division of Food Engineering, Lund University,
Alnarp (Sweden)
(Accepted June 16, 1973, lwt228)

A method for registration of the temperature in the centre of fried meat balls has been tested.

After frying under known conditions the meat balls were cut in two and the cut surface was immediately photographed with a heat camera. The photographs showed a number of concentric rings. From the photographs it was possible to calculate the temperature as a Function of the distance from the centre.

Introduction

Determination of temperatures by means of thermocouples in the foodstuff during the heating cycle may be exposed to many difficulties, e.g.

- 1) Difficult to determine the position of the thermocouple.
- 2) Heat is conducted via the thermocouple into the product.
- 3) Surrounding fluid enters through the hole made by the wire of the thermocouple.

These problems are particularly difficult to overcome when several points are measured at the same time.

Another method of temperature determination is photography with a heat camera. Such a system, called Thermovision, has been developed by AGA Infrared Systems Ltd, Lidingö, Sweden. Thermovision is based on the principle: A camera continuously analyses the infrared spectrum emitted by the object and transmits the information to a unit that shows the thermopicture in ten colours on a screen. A more detailed description can be found in (ref. 1) or in AGA's brochures.

Procedure

The meat balls were made industrially and contained 14% fat and 66% water. They were kept frozen and then allowed to thaw for 24 hours at 5 °C before measuring. Deep Fat Frying was carried out in a palm oil bath at 160 °C. After a certain time – 1, 2, 3 and 5 mins. – one meat ball was taken out, placed in a special holder and quickly cut in two with a thin, sharp steel blade. Ten heat photographs of the cut surface were then taken at an interval of 0.5 secs. The camera was started during the cutting. In this way it was possible to obtain a photograph of the section already during the first half second after cutting.

Evaluation of the Photographs

A number of coloured, concentric rings were found on the photographs **Fig. 1**. The corresponding colour scale is shown on the scale under the photographs. The scale was calibrated by means of a special diagram. However, one point with a known temperature was required. Therefore an object with a known surface temperature was photographed – in this case a thermometer bulb in temperature equilibrium with the ambient temperature. The camera equipment could be adjusted so that the reference temperature (25 °C) was indicated on the scale (0.43) and also appeared as a white circle on the photograph. The appearance of the calibration curve is shown in **Fig. 2**. **Fig. 3** was obtained by measuring the diameters of the circles where they change colour and then converting them to radial coordinates.

Only the first photograph in the series of 10 of the cut section was used as the difference from photograph to photograph was so small that no extrapolation backwards to the cutting moment was necessary.

Alternative Cutting Methods

Three methods for rapidly obtaining a clean sectional area were tried.

- 1) Sawing with a thin, sharp blade.
- 2) Cutting with piano wire.
- 3) Chopping with a thin, spring loaded blade.

The fried meat ball consists of a rather hard exterior which surrounds a relatively loose interior. Consequently method 2 did not work. The piano wire could not pass through the surface without damaging the entire meat ball. A sharp cutting tool, that should also have a low heat absorption, was consequently required, **Fig. 4**. Method 1 was found to give a better sectional area and was used for the tests.



Fig. 1. Thermovision photographs of meat balls fried for A: 1 min.; B: 2 min.; C: 3 min.; D: 5 min.; in palm oil at 160°C

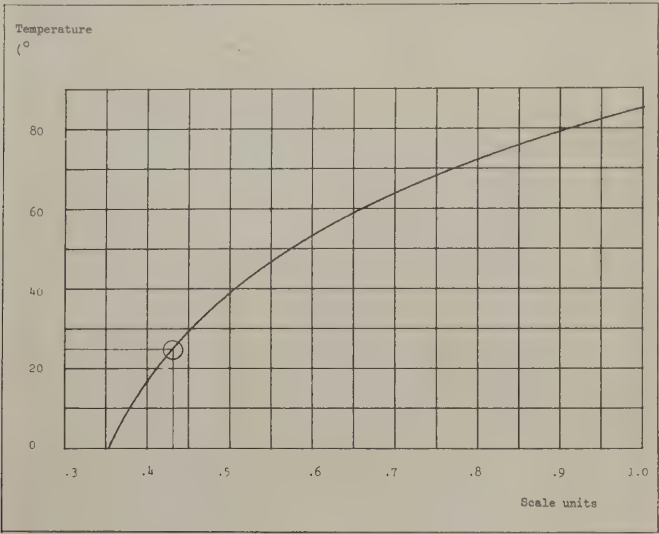


Fig. 2. Calibration curve for conversion of the scale of the thermopicture to true temperature

Fig. 3. Temperature distribution in a meat ball according to Thermovision measuring. Oil temperature 160 °C

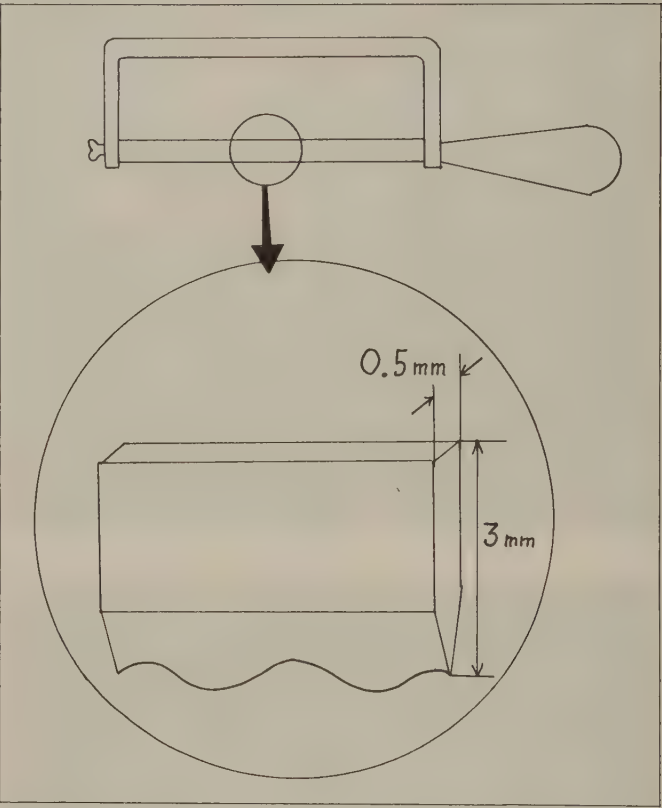
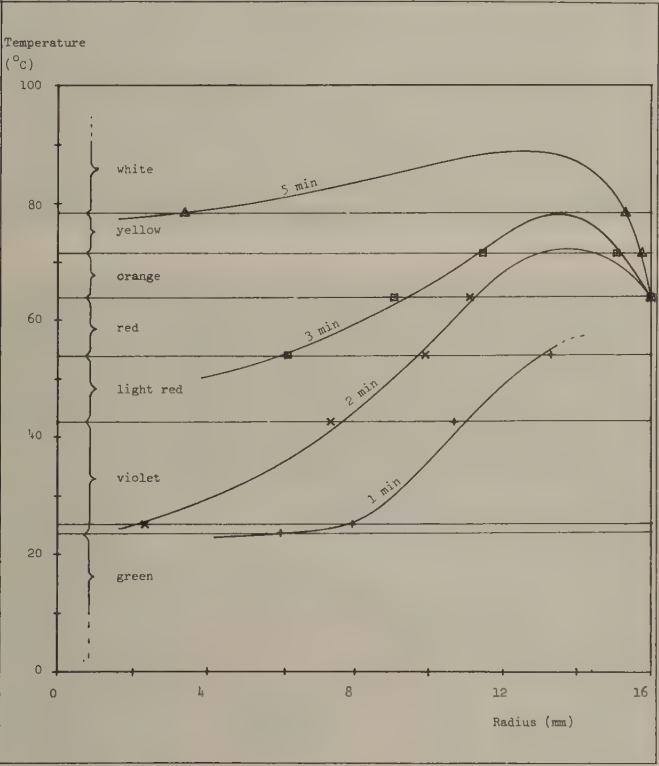
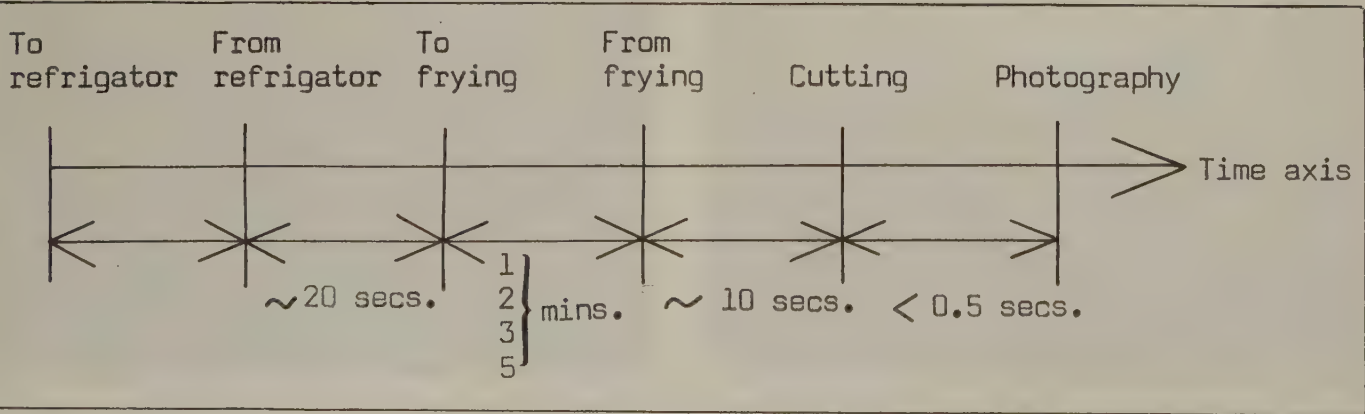


Fig. 4. The cutting tool consists of a thin serrated steel blade

Fig. 5. Time schedule for the experiments



Results and Discussion

Several test series with varying oil temperatures were carried out. Four frying times in each series were investigated: 1, 2, 3 and 5 mins. **Fig. 5** shows that it took about 10 seconds from the time the meat ball was taken from the frying bath until it was placed in the holder and cut. During this period the heat convection and evaporation resulted in rapid cooling of the surface. This affects the temperature to a certain depth from the surface. Simulation of the entire temperature process in a computer, using a simple mathematical model, shows that after 10 seconds the temperature was affected 4 mm into the meat ball. This complies with **Fig. 3**. The simulation is shown in **Fig. 6**. The mathematical model assumes that the meat ball is a homogenous sphere with a radius of 16 mm and that the surface temperature immediately becomes 100 °C. Thermal diffusivity $0.173 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. After the stipulated frying time the surface temperature conditions were changed to 60 °C during 10 seconds.

These assumptions should be sufficient to correct the temperature curves. **Fig. 3** could consequently be corrected for surface cooling by, during the simulations with the above mentioned model, assuming different temperature distributions at the time of the removal of the meat ball from the oil bath and comparing the resulting distribution at the moment of cutting with the actual distribution. The temperature distribution when the meat ball was removed from the oil bath should therefore have been as shown in **Fig. 7**. The broken lines show the temperatures according to the mathematical model and has been drawn for comparison.

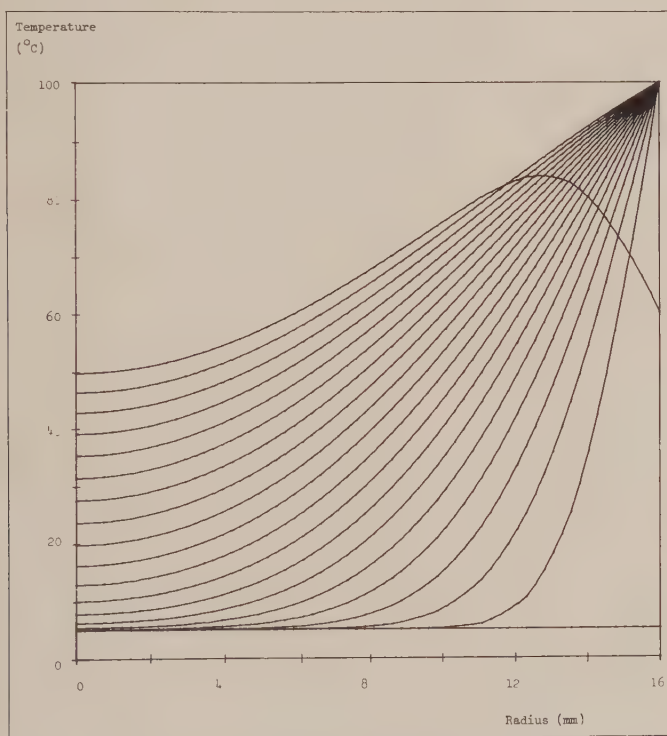


Fig. 6. Simulation of the temperature development in a meat ball with a radius of 0.016 m. The surface temperature immediately becomes 100 °C. The thermal diffusivity is assumed to be $0.173 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

(Ten seconds between each curve).

The last curve, deviating from the other curves, shows the temperature distribution ten seconds after the meat ball has been removed from the frying bath.

In **Fig. 3** when following the 1 min. curve towards the centre it is found that it deviates at approx. 25 °C and becomes almost horizontal. This was characteristic of all test series. Checks with thermocouples showed that the true temperature in the

centre was approx. 10 °C lower after 1 min. The explanation may be that steam from the surrounding atmosphere condensates in the layer bordering the cold, central parts of the cut meat ball and that the camera, which has a very small penetration depth, registers the border layer heated by condensation instead of the surface.

Accuracy and application of the method

Computer simulations showed that the 20 seconds at room temperature which elapsed before frying **Fig. 5** have no effect on the final temperature. In some cases the inability of the camera to register temperatures below 30 °C exactly, is naturally a limitation of the measuring method but this disadvantage can be avoided by thawing at 25 °C instead of at 5 °C.

With the exception of the points which are within 4 mm from the surface and below 30 °C, the accuracy is largely determined by the precision in the calibration curve **Fig. 2**. The accuracy in this curve decreases with the distances from the reference point. Therefore it may be advisable to use two reference temperatures. The total accuracy of the measuring range in question has been calculated ± 5 °C.

The measuring method is mainly applicable when there is interest for the temperature at more than one point. Measuring of the center temperature requires extrapolation which reduces the accuracy. A mathematical model can be of help here as well.

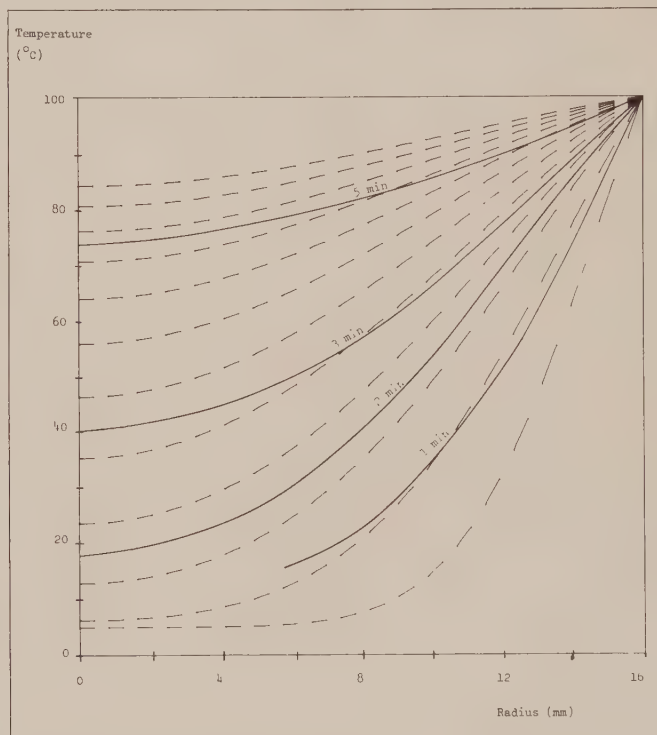


Fig. 7. The continuous line: Temperature distribution in a meat ball. Oil temperature 160 °C. The curves are corrected for surface cooling. Broken lines: the temperature distribution according to a mathematical model (30 seconds between each curve)

Acknowledgement

This work has been supported by a grant from the Swedish Board for Technical Development.

The assistance of **Margareta Johansson** and **Christer Sirath**, chemical engineers, during the experimental part of this study has been invaluable.

References

1. N.E. BENGTTSSON, E. LYCKE, J. of Microwave Power, 4 (2), 1969

BESTÄMNING AV VÄRMETEKNISKA DATA FÖR KÖTTFÄRS SOM FUNKTION AV TEMPERATUR OCH RECEPTUR

- Värmekapacitet med hjälp av Differential Scanning Calorimetri
Per Sörenfors, LTH.
- Temperaturledningstal genom numerisk anpassning till uppmätta
temperaturförlopp
Magnus Dagerskog, SIK.

Innehållsförteckning

Summary in English

Sammanfattning

1. Inledning
2. Målsättning
3. Råvara
4. Bestämning av värmekapacitet
 - 4.1 Teori
 - 4.2 Resultat
 - 4.3 Diskussion
5. Bestämning av temperaturledningstal
 - 5.1 Litteratur
 - 5.2 Experimentellt
 - 5.2.1 Värmeledningsmetodik
 - 5.2.2 Temperaturmätning
 - 5.3 Beräkningsmetodik
 - 5.4 Resultat
 - 5.5 Diskussion
 - 5.5.1 Temperaturberoendet
 - 5.5.2 Receptberoendet
6. Beräkning av värmeledningstal
 - 6.1 Uttryck för täthet
 - 6.2 Uttryck för värmeledningstal
7. Avslutning
8. Litteraturförteckning
9. Tabeller och figurer

Sammanfattning.

Kunskaper om hur värmetekniska data för köttfärsprodukter varierar med temperatur, vatten- och fetthalt saknas i stor utsträckning. Avsikten med denna undersökning var därför att först utprova två snabbmetoder för bestämning av specifikt värme (c_p) och temperaturlledningstal (a) och därefter genom experimentella studier kartlägga sambanden och söka nå fram till allmängiltiga ekvationer för temperatur, vatten och fetthaltsberoendet.

För bestämning av värmekapacitet i intervallet 15 till 90°C användes "Differential Scanning Calorimetri" där provet värms med en bestämd hastighet under väldefinierade förhållanden. Skillnaden i tillförd effekt till provet och till ett referensprov är i princip proportionellt mot provets värmekapacitet.

För bestämning av temperaturlledningstalet i intervallet 15 till 70°C värmdes köttfärsprover i en dubbelsidig stekhäll med en konstant temperaturgradient över provet. Genom anpassningsberäkningar mellan experimentellt uppmätta och datorsimulerade temperaturförlopp i centrum och ytskikten kunde temperaturlledningstalet och dess temperaturberoende bestämmas.

De erhållna sambanden för beräkning av värmetekniska data för köttfärs som funktion av vattenhalt (w), fetthalt (f) och temperatur (t) kan sammanfattas i följande ekvationer:

$$\begin{aligned}\lambda &= 0.50 - 0.92 \cdot f + 0.0024 \cdot t \quad [\text{W/m, } ^\circ\text{C}] \\ \rho &= 1300 - 300 \cdot w - 400 \cdot f - (0.4 \cdot w + 0.7 \cdot f) \cdot t \quad [\text{kg/m}^3] \\ c_p &= 1600 + 2600 \cdot w + 15 \cdot t \cdot f \quad [\text{J/kg, } ^\circ\text{C}] \\ a &= \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}\end{aligned}$$

Summary.

Knowledge of thermal properties of minced meat products and their dependence on temperature and composition (water and fat content) is to a large extent missing. The object of this work therefore was to develop two methods for determination of specific heat (c_p) and thermal diffusivity (a) and to use the methods for determination of the dependence of temperature, water and fat content.

For determination of specific heat in the temperature interval 15 to 90°C "Differential scanning calorimetry" was used where the meat sample is heated at a constant rate. The difference in energy consumption between the test sample and the reference sample is proportional to the heat capacity of the meat sample.

For determination of thermal diffusivity in the temperature interval 15 to 70°C meat samples were heated in a double-sided contact fryer at constant temperature gradient across the sample. By correlation between simulated and experimentally determined temperatures the thermal diffusivity and its temperature dependence could be calculated.

The found dependence of thermal properties on water content (w), fat content (f) and temperature (t) can be summarized by the following expressions:

$$\begin{aligned}\lambda &= 0.50 - 0.92 \cdot f + 0.0024 \cdot t \quad [\text{W/m, } ^\circ\text{C}] \\ \rho &= 1300 - 300 \cdot w - 400 \cdot f - (0.4 \cdot w + 0.7 \cdot f) \cdot t \quad [\text{kg/m}^3] \\ c_p &= 1600 + 2600 \cdot w + 15 \cdot t \cdot f \quad [\text{J/kg, } ^\circ\text{C}] \\ a &= \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}\end{aligned}$$

1. Inledning.

Kunskaper om värmetekniska data (värmeledningstal, temperaturledningstal och specifikt värme) för olika livsmedel och dessa storheters variation med temperatur, vatten- och fetthalt är av stor betydelse för forskning och utveckling kring olika värme- och kylprocesser. Exempel härpå utgör optimering av värmeväxlare, torknings-, frys- och steriliseringsutrustning samt av värmningsprocesser som stekning, kokning och bakning.

Dessa nödvändiga värmetekniska data är inte alltid så lätt att finna, och i de fall de finns rapporterade är överensstämmelsen mellan olika mätningar ofta dålig. Problemet är att livsmedelsråvarans sammansättning varierar och är svår att definiera ordentligt. Dessutom används ett stort antal olika mätmetoder som introducerar större eller mindre mätfel.

I många rapporterade undersökningar över värmetekniska data för livsmedel har man även underlåtit att tillräckligt noga beskriva omständigheterna under vilka mätningarna genomföres, t ex om värmetransporten sker vinkelrätt eller parallellt mot muskelfibrerna i ett köttprov. Vidare saknas ofta tillräcklig information om provets sammansättning.

I avsnitt 8 finns några av de oftast citerade litteraturreferenserna med uppgifter om värmetekniska data sammanställda. Mest litteraturunderlag finns för helt kött och fisk.

2. Målsättning.

Att utprova två snabbmetoder för bestämning av specifikt värme (c_p) och temperaturledningsdata (a) för köttfärs och studera inverkan av temperatur-, vatten- och fetthalt på de värmetekniska egenskaperna. Genom sambandet $\lambda = a \cdot \rho \cdot c_p$, kommer även värmeledningstalet (λ) indirekt att kunna beräknas när temperaturledningstalet (a), specifika värmet (c_p) och densiteten (ρ) är kända.

2.

3. Råvara.

För försöken tillverkades en köttfärsblandning med följande ingredienser:

87% nötkött
6% vatten
4% potatismjöl
2% mjölkpulver
1% salt

Köttdelen, som utgjordes av innanlår och nöt III maldes och blandades i olika proportioner för att ge följande variation i vatten- och fetthaltsvärden på den färdiga färsen.

Recept nr	Vattenhalt %	Fetthalt %
1	59.4	17.2
2	61.8	14.5
3	64.3	11.1
4	66.6	7.4
5	68.9	5.2
6	71.3	1.4

Vattenhalten bestämdes genom frystorkning och fetthalten genom SBR råfettanalys. De färdiga köttfärsblandningarna formades till hamburgare, som tunnelfrysades vid -30°C och förvarades frysta fram till att de skulle användas för analys av de värmetekniska egenskaperna.

4. Bestämning av värmekapacitet.

4.1. Teori.

Differential Scanning Calorimetri innebär att ett litet prov värmes så att temperaturen ökar linjärt med tiden. Detta ombesörjes av s k scanner. En skrivare registrerar skillnaden mellan tillförd effekt till prov med provhållare och tillförd effekt till en annan, oftast tom provhållare. Denna skillnad är ett mått på provets värmekapacitet. Emellertid bortkyles en del värme från provet av omgivande luft. Men genom att göra en mätning utan prov, erhålles en baslinje på skrivaren, som alltså motsvarar värmekapaciteten noll. Skrivarutslaget mätt från baslinjen är direkt proportionellt mot provets värmekapacitet. I de fall då man mäter vid låg temperatur (under 50°C) måste kylning av omgivande luft tillgripas. Rent praktiskt resulterar detta i att den luft, som omger provet får en slumpvis varierande temperatur. Baslinjen blir därför ej reproducerbar, vilket är en förutsättning för god noggrannhet då ju baslinjen tas upp vid en annan tidpunkt än själva mätningen.

Vid mätning på köttfärs ($0-100^{\circ}\text{C}$) användes därför en annan metod, som går ut på att mäta skillnaden mellan skrivarutslag under temperaturstegring och då scannern står stilla. Denna skillnad är också ett mått på provets värmekapacitet. Praktiskt utföres mätningen så att scannern startas, köres tills transienterna försvunnit, stoppas och startas igen då ny jämvikt inställt sig, stoppas åter då transienterna försvunnit o s v. Vid en scanninghastighet på $16^{\circ}\text{C}/\text{min}$ är det lämpligt att mäta vid var 15°C , eftersom det tar ca 1 min innan transienterna helt försvunnit (d v s pseudojämvikt inställt sig i provet).

Skrivaren registrerar:

$$u = k \cdot (v \cdot m \cdot c_p + v \cdot C_p + Q) \quad (4:1)$$

u är skrivarutslaget (mm)

k är en proportionalitetskonstant (mm/W)

v är scanningshastigheten ($^{\circ}\text{C/s}$)

m är provets massa (kg)

c_p är provets värmekapacitet ($\text{J/kg}, ^{\circ}\text{C}$)

C_p är provhållarens totala värmekapacitet ($\text{J}/^{\circ}\text{C}$)

Q är kyleffekten (W)

Då scannern stoppas blir $v = 0$ och utslaget enligt ekv:

$$u_o = k \cdot Q \quad (4:2)$$

Skillnaden mellan skrivarutslagen, Δu , erhålles genom att subtrahera ekv 2 från ekv 1:

$$\Delta u = k \cdot v \cdot (m \cdot c_p + C_p) \quad (4:3)$$

Genom att göra mätningar utan prov blir $m = 0$ i ekv 3 och man får då:

$$\Delta u_o = k \cdot v \cdot C_p \quad (4:4)$$

Ett reducerat värde kan då definieras som:

$$\Delta u_{\text{red}} = \Delta u - \Delta u_o \quad (4:5)$$

Efter insättning av ekv 3 och 4 erhålles:

$$\Delta u_{\text{red}} = k \cdot v \cdot m \cdot c_p \quad (4:6)$$

Den konstanta faktorn $k \cdot v$ erhålles bäst genom att mäta på rent vatten som har välkända värmekapacitetsdata. Det bör också påpekas att provet är lufttätt inneslutet i en aluminiumkapsel, som beräkningsmässigt antages tillhöra provhållaren (d v s ingår i C_p). Det fel som uppstår i och med att dessa kapslar har något olika vikt är helt försumbart.

4.2. Resultat.

Mätningarna utföres med en scanninghastighet på $16^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Apparaten startades vid 15°C och stoppades sedan vid 30, 45, 60, 75 och 90°C . Grundvärdena, Δu , mättes upp direkt på skrivepapperet i mm enligt tabell 1. Där är även vägningen redovisad. Mätningar på tom kapsel, Δu_0 , återfinnes i tabell 2. De enligt ekv 5 beräknade reducerade värdena presenteras i tabell 3.

Ekv 6 användes sedan för att beräkna faktorn $k \cdot v$ med ledning av tabell 3 (vatten) och tabell 4. Resultaten framgår av tabell 5. Respektive medelvärde används för varje temperatur. Sålunda beräknas värmekapaciteten för de sex recepten genom att lösa ut c_p ur ekv 6. Resultaten återfinnes i tabell 6.

I diagram 1 har medelvärmekapaciteterna för de sex recepten inprickats mot temperaturen. Man kan skönja en tendens till ökning av värmekapaciteten med temperatur och receptnummer. Värdena vid 30°C är misstänkt höga, vilket bör bero på att partiell smältning äger rum. Värdena har ändå medtagits i analysen eftersom smältvärmets för fett bara är en blygsam del av köttfärsens enthalpikurva och eftersom den linjära formel, som fås fram genom att statistiskt bearbeta dessa data skall anses innefatta även smältdelen.

4.3. Diskussion.

Värmekapaciteten för ett recept antas vara summan av värmekapaciteten för de ingående komponenterna, vatten, fett och torrs substans. Med torrs substans menas i fortsättningen fettfri substans. c_p för vatten är välkänt och kan sättas till $4190 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C}$ och c_p för torrs substansen ansättes konstant. Temperaturberoendet torde bero mest på fetthaltstermen, vilken sålunda ansättes som en linjärfunktion av temperaturen. Följande formel erhålles då:

$$c_p = 4190 \cdot w + a_0 \cdot (1 - w - f) + (a_1 + a_2 \cdot t) \cdot f \quad (4:7)$$

där w betyder vattenhalt (kg/kg), f betyder fetthalt (kg/kg) och t är temperaturen ($^{\circ}\text{C}$). a_0 , a_1 och a_2 är ansatta konstanter.

För att en statistisk analys skall kunna utföras måste ekv 7 skrivas om på lämpligt sätt:

$$\frac{c_p - 4190 \cdot w}{(1 - w - f)} = a_0 + a_1 \cdot \frac{f}{(1 - w - f)} + a_2 \cdot \frac{f \cdot t}{(1 - w - f)} \quad (4:8)$$

Denna ekvation kan anses uppfylla villkoren för att man skall kunna utföra en linjär multipelregressionsanalys. Faktorn $(100 - w - f)$ är nämligen nästan konstant. Analysen utföres ej på medelvärdena utan på samtliga 90 mätdata för att få så stor statistisk säkerhet som möjligt. Följande värden på koefficienterna erhöles:

$$\begin{cases} a_0 = 1570 \pm 130 \\ a_1 = 1790 \pm 300 \\ a_2 = 15.4 \pm 4.2 \end{cases}$$

Felgränserna framkom ur en prediktionsintervallanalys med säkerheten 95% (*). Med insättande av koefficienterna i ekv 7 och omskrivning erhålles:

$$c_p = 1570 + 26.2 \cdot w + 2.2 \cdot f + 0.154 \cdot f \cdot t \quad (4:9)$$

Med hänsyn till felgränserna hos koefficienterna bör vissa avrundningar göras, varvid termen $2.2 \cdot f$ faller bort. Detta har sin förklaring i att c_p för fett och torrsubstans är ganska lika. Den avrundade ekvationen får följande utseende:

$$c_p = 1600 + 26 \cdot w + 0.15 \cdot t \cdot f \quad (4:10)$$

Ekv 10 är uppritad för de sex olika recepten i figur 1. Noggrannheten i c_p beräknad ur felgränserna blir 10%, vilket pekar på att formeln är grov. Den verkliga noggrannheten torde dock vara betydligt bättre, vilket man får en uppfattning om genom att studera överensstämmelsen mellan mätdata och kurvskaran i diagram 1. För köttfärs torde den verkliga noggrannheten sålunda vara 5%. För andra livsmedel kan formeln användas i brist på exaktare tabelldata. Exempelvis kan man sätta in vattenhalten 75% och fetthalten 0% för potatis och få fram värmekapaciteten 3550 J/kg, °C, vilket överensstämmer mycket väl med litteraturodata.

5. Bestämning av temperaturledningstal.

5.1. Litteratur.

Ett stort antal metoder för experimentell bestämning av värmelednings- och temperaturledningstal finns redovisade i litteraturen. Tye /1/ och Reidy och Rippen /2/ har gjort utmärkta sammanställningar och klassificeringar av metoderna. I det enklaste fallet utgår man från ett uppmätt temperaturförlopp i centrum av en kropp som värms vid konstant temperatur. Avsätts logaritmen för den dimensionslösa temperaturen mot värmningstiden fås då enligt Ball och Olsson /3/ en rät linje ur vars lutning termiska diffusiviteten för kroppen i fråga kan bestämmas. Metoden förutsätter att temperaturledningstalet är temperaturoberoende för att det linjära förhållandet skall erhållas. Så är inte fallet för de flesta livsmedel, varför man får knyckar i lin-log-diagrammet. Genom att temperaturgradienten i provet dessutom hela tiden varierar med värmningstiden kan man inte relatera eventuella brytpunkter till någon specifik produkttemperatur (t ex fasomvandlings-temperatur).

Med en annan metodik som bl a föreslagits av Dickerson /4/ utgår man från ett linjärt uppvärmningsförlopp av provet. Härvid fås efter en viss tid (lagfasen) en konstant temperaturgradient i provet. Med utgångspunkt från den allmänna värmeledningsekvationen kan man härleda ett temperaturledningstal med kännedom om upphettningshastigheten och med uppmätta temperaturdifferenser mellan yta och centrum.

Stora krav ställs på värmningsutrustningen för att det önskade linjära värmningsförloppet bibehålls under hela mätprocessen. Liksom för den tidigare beskrivna metoden kan det vara svårt att utvärdera temperaturledningstalets temperaturberoende.

En annan intressant metod är den s k "värmepulsmetoden" i vilken provet i form av en tablett ligger isolerat i en behållare och från ena sidan tillföres en kort värmepuls från en laserstråle eller IR-lampa. Genom att kontinuerligt registrera temperaturen på provets motsatta sida kan tidsfördröjningen till dess värmepulsen vandrat igenom provet be-

stämmas och därigenom även termiska diffusiviteten.

Genom att i förväg temperera provet till olika temperaturer och utnyttja värmepulser med liten amplitud kan även temperaturledningstalets temperaturberoende bestämmas.

Katayama et al /5/ har ytterligare utvecklat metoden för kontinuerlig bestämning av temperaturberoendet hos både värmelednings- och temperaturledningstalet samtidigt.

Slutligen finns ett antal metoder som bygger på jämförelser mellan experimentella temperaturstudier och simulerade temperaturförlopp. Hayakawa /6/ har beskrivit en metod där man utnyttjar den analytiska lösningen av värmeledningsekvationen för anpassningsberäkningarna. Andra författare (Mathews och Hall /7/) har på liknande sätt utnyttjat numeriska lösningsmetoder.

5.2. Experimentellt.

Principen för det här redovisade arbetet har varit att genom anpassningsberäkningar jämföra experimentellt uppmätta temperaturförlopp med de teoretiskt beräknade och därigenom bestämma temperaturledningstalet och dess temperaturberoende.

Följande kriterier skall uppfyllas:

- o Metoden skall vara snabb. Maximalt 15 minuter för hela analysen.
- o Den experimentella bestämningen skall kunna ske i befintlig dubbelsidig stekutrustning utan komplicerad reglerutrustning.
- o Ingen extra provberedning skall behövas, utan de färdiga hamburgarna skall kunna användas direkt.

5.2.1. Värminingsmetodik.

En mindre version av en dubbelsidig stekhäll som beskrivits av Dagerskog och Bengtsson /8/ utnyttjades för försöken. I figur 2 redovisas en principskiss över stekhällen. Under försökens gång hölls de två parallella stekhällarna på exakt 17.0 mm avstånd från varandra med distansklossar av teflon samt fjäderklämmor. Distansen var avpassad efter en dubbel hamburgare. Godset i hällarna utgjordes av aluminium men var belagt med ett teflonskikt

på ytan. För reglering och styrning av hålltemperaturen utnyttjades termoelement inborrade från sidan i aluminiumhällarna någon mm under stekytan. Termoelementet i underhällen kopplades till en reglerutrustning (beskriven av Dagerskog och Engwall /9/), som dessutom kopplades till ett annat termoelement ($\varnothing$ 0.15 mm) placerat mitt emellan de två hamburgare som värmdes samtidigt. Via reglerutrustningen kunde därvid temperaturen i hällarna styras så att önskad temperaturgradient erhöles över provet. Övre hällen regleras parallellt med underhällen. Före starten av ett nytt värmningsförsök kyles hällarna ner till rumstemperatur med fuktade svampar. En kylskåpskall dubbelhamburgare, preparerad med termoelement, placeras därefter mellan hällarna som fixeras till rätt avstånd. Reglerutrustningen med förinställd temperaturdifferens mellan yta och centrum, normalt 25°C , startas. Värmningsförsöket avbryts när yttemperaturen uppnår 90°C . Värmningshastigheten uppgår till ca $1^{\circ}\text{C}/10$ sekunder vid 25°C temperaturdifferens. En höjning av centrumtemperaturen från 6°C till 65°C tar därvid ca 10 minuter.

5.2.2. Temperaturmätteknik.

Under värmningsförsökens gång registrerades temperaturförloppet via 8 st inkopplade termoelement. Förutom de båda hålltemperaturerna registrerades temperaturen i två punkter på vardera ytan och i centrumskiktet mellan de båda sammanbakade hamburgarna. Termoelementen var av typen koppar/konstantan, teflonklädda med en ytterdiameter på 0.15 mm. Själva lödpunkten var förstora till en yta på ca 4×4 mm med hjälp av aluminiumfolie. Centrumtermoelementen kommer automatiskt på rätt plats mellan hamburgarna. Yttermoelementen placeras på hamburgarens yta, men intryckt så mycket att de kom helt i linje med köttytan utan utstickande delar. För att ytterligare få kontroll på termoelementens placering och underlätta hanteringen av den råa dubbelhamburgaren placerades en tunn plastfolie (ugnsfolie, polyamid) på varje hamburgeryta, som under värmningsförloppet kom att ligga mellan stekhällen och hamburgerytan med fixerade termoelement. Genom att både hålltemperaturen och yttemperaturen på hamburgaren registrerades kunde i efterhand kontrolleras om något yttermoelement visat avvikande temperaturer. Yttemperaturerna låg som tidigare nämnts hela tiden under 90°C .

Data från alla termoelementen registrerades under försöken, en gång var 10:e sekund, med hjälp av en Schlumberger datainsamlingsutrustning och samlades på hållremsa för senare vidarebearbetning. Figur 3 visar en plottning av ett normalt temperaturförlopp.

5.3. Beräkningsmetodik.

För att kunna anpassa ett teoretiskt beräknat temperaturförlopp till det experimentellt uppmätta måste numeriska metoder utnyttjas för att lösa värmeledningsekvationen. Principen för den sk finita differensmetoden (Rosenberg /16/) går ut på att differential-ekvationen omvandlas till en differensekvation d v s

$$\partial x \rightarrow \Delta x \quad (\text{indices } m)$$

$$\partial t \rightarrow \Delta t \quad (\text{indices } p)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \Rightarrow \frac{\Delta T}{\Delta t} = a \cdot \frac{\Delta^2 T}{\Delta x^2} \quad (5:1)$$

Differenserna kan med "forward differens"-teknik uttryckas som:

$$\Delta T_t = T_{m,p+1} - T_{m,p}$$

$$\Delta T_x = T_{m+1,p} - T_{m,p}$$

$$\Delta^2 T_x = (T_{m+1,p} - T_{m,p}) - (T_{m,p} - T_{m-1,p})$$

Insättes detta i ekvationen ovan fås:

$$T_{m,p+1} = T_{m,p} + a \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (T_{m+1,p} - 2T_{m,p} + T_{m-1,p}) \quad (5:2)$$

Ur denna algoritm kan nu temperaturfördelningen vid tiden $(p+1)$ beräknas i punkten m om den är känd vid tiden p i punkterna $m-1$, m och $m+1$. Indelningen i antal tidssteg ges av sambandet:

$$a \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \leq \frac{1}{2}$$

Den redovisade lösningen av värmeledningsekvationen bygger egentligen på att temperaturledningstalet (α) ej är temperaturberoende. För mindre variationer i α -värdet med temperaturen och för små temperaturgradienter, som gäller under dessa försök, kan man utan problem använda samma lösningsmetodik.

Två olika metoder för att anpassa de simulerade och de experimentella temperaturförloppen har använts. Den första bygger på antagandet att temperaturledningstalet är linjärt beroende av temperaturen. Med de experimentellt uppmätta yttemperaturerna som indata genomförs i simuleringsprogrammet, för olika värden på α -värdets temperaturberoende, beräkningar av centrumtemperaturen. Anpassningen mellan den experimentellt uppmätta och beräknade centrumtemperaturen bestäms genom minsta kvadrat-anpassning (figur 4). Härvid bestäms även standardavvikelsen.

Som komplement till den linjära modellen användes även en metodik med fri anpassning av α -värdet för att få överensstämmelse mellan experimentellt uppmätt och beräknad centrumtemperatur. α -värdet justerades först när avvikelsen mellan den beräknade och simulerade centrumtemperaturen översteg 0.2°C .

5.4. Resultat.

För att studera om temperaturledningstalets temperaturberoende är beroende av den utnyttjade temperaturgradientens storlek utfördes först förförsök med olika uppvärmningshastigheter. I figur 5 visas resultatet för de två uppvärmningshastigheterna, som motsvarar 15 och 40°C temperaturgradient. I det övre diagrammet har det erhållna α -värdet avsatts mot volymsmedeltemperaturen och i det nedre diagrammet har motsvarande temperaturavvikelse mellan den experimentellt uppmätta och den beräknade centrumtemperaturen avsatts mot volymsmedeltemperaturen. Som synes har uppvärmningshastigheten stor betydelse för det erhållna temperaturberoendet hos α -värdet. En jämförelse mellan 15 och 25°C temperaturdifferens visar dock god överensstämmelse, varför 25°C valdes som standardvärde för de fortsatta försöken.

För vart och ett av de sex recepten genomfördes sedan tre mätningar (replikat). Alla temperaturdata upptogs på håltremsa

och efter att försöken avslutats lästes alla data in och behandlades i en dator. Härvid visade det sig att vid några av mätningarna hade ett termoelement varit trasigt eller något annat fel inträffat. Minst två mätningar per recept var dock användbara. Resultaten från mätningarna redovisas i tabell 7 och för recept nr 2 i figur 6. I det övre diagrammet har även inlagts resultat från den icke-linjära anpassningen av temperaturledningstalet. Den visade linjära anpassningen utgör ett medelvärde av resultatet från de enskilda mätningarna.

5.5. Diskussion.

5.5.1. Temperaturberoendet.

Även om variationen mellan olika försök är relativt stor fås ett medeltal på temperaturberoendet för alla sex recepten som ligger mellan 0.0070 och $0.0079 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}, ^\circ\text{C}$. Det gemensamma medelvärdet är $0.0073 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}, ^\circ\text{C}$, vilket motsvarar ett tillskott på $0.44 \times 10^{-07} \text{ m}^2/\text{s}$ för 60°C temperaturhöjning. Resultaten stämmer rätt väl med resultat av Rubanik et al /10/ för malt nötkött (74% vatten, 0.2% fett och 2% salt):

$$a = 21.1 (90 - T)^{-0.127} \cdot 10^{-8} \pm 0.2 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$$

Vid 20°C ger ekvationen ett värde på $1.23 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ och vid 80°C $1.59 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

Riedel /11/ anger ett något lägre temperaturberoende på $1.23 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ vid 20°C och $1.42 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ vid 80°C för 70% vattenhalt.

5.5.2. Receptberoendet.

En sammanställning av a-värdets temperaturberoende för de sex olika recepten i figur 7a visar att a-värdet stiger med ökande vattenhalt och minskande fetthalt. Vattenhalten stiger i medeltal med 2.4% från 59.4% (recept 1) till 71.3% (recept 6) och fetthalten minskar från 17.3% (recept 1) till 1.4% (recept 6) med ett medeltal på 3.2%. En jämförelse mellan de sex recepten, från resultaten av den olinjära anpassningen av a-värden i figur 7b, visar tydligare inverkan av fetthalten. För recept 1

och 2 med låg fetthalt fås en relativt linjär ökning av a -värdet med temperaturen, medan för recepten med högre fetthalt fås förhöjd temperaturledning i intervallet 20 till 30°C. Dessutom medför de feta recepten att a -värdets temperaturberoende avtar eller är konstant i intervallet över 60°C.

I avsnitt 6 har de uppmätta data använts för att bestämma en modell för värmeledningstalets ($\lambda = a \cdot \rho \cdot c_p$) temperatur, vatten- och fetthaltsberoende.

6. Beräkning värmeledningstal.

Inledningsvis nämndes att värmeledningstalet λ bestäms av sambandet:

$$\lambda = a \cdot \rho \cdot c_p \quad (6.1)$$

För att kunna beräkna λ måste sålunda tätheten ρ vara känd för olika recept och temperatur.

6.1. Uttryck för tätheten.

En linjär sammansättning av de ingående temperaturernas täthet bör kunna antagas eftersom löslighetsinteraktion inte föreligger:

$$\rho = \rho_w \cdot w + \rho_f \cdot f + \rho_{ts} \cdot (1-w-f) \quad (6.2)$$

I Perry: Chem. Eng. Handbook /12/ finns data för vatten på vilka en linjär anpassning mellan 10°C och 80°C ger:

$$\rho_w = 1006 - 0.4 \cdot t \quad \text{kg/m}^3 \quad (6.3)$$

I verket "Wärmephysikalische konstanten von Lebensmitteln und Halbfabrikaten" /13/ finns en del data för olika fetter och oljor ur vilka följande uttryck för nötfett erhålles:

$$\rho_f = 900 - 0.7 \cdot t \quad \text{kg/m}^3 \quad (6.4)$$

Data för torrrsubstans finns inte direkt men kan räknas fram baklänges ur ekv 6.2, 6.3 och 6.4 eftersom köttfärs vid 20°C med $w = 0.654$ och $f = 0.129$ har visat sig ha tätheten 1050 kg/m^3 /14/. Härvid erhålles:

$$\rho_{ts} = 1300 \text{ kg/m}^3 \quad (6.5)$$

Temperaturberoendet försummas här eftersom ts-halten är låg och jämförelse kan göras med fettfri fiskmuskel /13/
 $w = 0.76$, $\rho = 1060 \text{ kg/m}^3$ vilket ger $\rho_{ts} = 1250 \text{ kg/m}^3$.

Då ekvationerna 6.2, 6.3, 6.4 och 6.5 slås samman och förenklas erhålles:

$$\rho = 1300 - 300 \cdot w - 400 \cdot f - (0.4 \cdot w + 0.7 \cdot f) \cdot t \quad (6.6)$$

6.2. Uttryck för värmeledningstalet.

Fett har ett mycket lågt värmeledningstal ($\sim 0.17 \text{ W/m, } ^\circ\text{C}$) i jämförelse med vatten ($\sim 0.60 \text{ W/m, } ^\circ\text{C}$) och torrrsubstans.

λ_{ts} antages här vara lika med λ_w . Då ts-halten är låg är felet praktiskt försumbart. Följande modell antages:

$$\lambda = (\lambda_w + k_w \cdot t) \cdot (1 - f) + (\lambda_f + k_f \cdot t) \cdot f - \gamma \cdot f \quad (6.7)$$

Detta är alltså en linjär sammansättning av komponenternas värmeledningstal, korrigerad med en term $\gamma \cdot f$, eftersom värmeledningstalet alltid blir lägre än vad en linjär sammansättning ger (Jfr t ex Krischer /15/).

En förklaring till formeln demonstreras i figur 8. Ekvation 6.7 kan förenklas genom omkrivning:

$$\lambda = \lambda_w - (\gamma + \lambda_w - \lambda_f - k_f \cdot t) \cdot f + k_w \cdot t + k_w \cdot t \cdot f \quad (6.8)$$

Fettets temperaturkoefficient är helt försumbar (d v s $k_f = 0$).

Vid fetthalter under 30% kan man också slopa termen

$k_w \cdot t \cdot f$. Om resterande konstanter slås ihop erhålles:

$$\lambda = A - B \cdot f + C \cdot t \quad (6.9)$$

Denna linjära modell anpassas till de data som erhöles i avsnitt 5 (temperaturledningstal). λ beräknas då med formlerna 6.1, 6.6 och 4.10. Följande uttryck erhålles då:

$$\lambda = 0.50 - 0.92 \cdot f + 0.0024 \cdot t \left[\text{W/m, } ^\circ\text{C} \right] \quad (6.10)$$

Med hänsyn till tidigare diskuterade felgränser torde noggrannheten för λ vara $\pm 10\%$, men erfarenhet med datasimuleringar m m visar att felet kan vara högst $\pm 5\%$ eller $0.03 \text{ W/m, } ^\circ\text{C}$.

7. Avslutning.

De två metoderna som vi utvecklade (i avsnitt 4 och 5) ger ingen stor noggrannhet, men är framför allt avsedda som snabbmetoder, eftersom exaktare c_p - och a -bestämningar tar betydligt längre tid i anspråk. Önskas större noggrannhet kan man utöka antal försök och få bättre underlag för medelvärdet.

En sammanställning av de erhållna sambanden för beräkning av värmetekniska data för köttfärs som funktion av vattenhalt (w), fetthalt (f) och temperatur (t) har gjorts nedan:

$$\begin{aligned} \lambda &= 0.50 - 0.92 \cdot f + 0.0024 \cdot t \left[\text{W/m, } ^\circ\text{C} \right] \\ \rho &= 1300 - 300 \cdot w - 400 \cdot f - (0.4 \cdot w + 0.7 \cdot f) \cdot t \left[\text{kg/m}^3 \right] \\ c_p &= 1600 + 2600 \cdot w + 15 \cdot t \cdot f \left[\text{J/kg, } ^\circ\text{C} \right] \\ a &= \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \end{aligned}$$

För vattenhaltsintervallet 50-80%, fetthaltsintervallet 0-30% och temperaturer mellan 0 och 100°C har även diagram (figur 9) uppgjorts som visar de erhållna sambanden.

För att ekvationerna skall vara giltiga gäller dock att TS-halten skall vara i intervallet 20-30%, vilket är fallet i de flesta färsprodukter.

8. Referenser.

1. Tye, R.P., 1969 The arts and practice of thermal conductivity measurements. ISA Conference Proceedings Advances in test measurements, 23, 523 (1968).
2. Reidy, G.A. & Methods for determining thermal
Rippen, A.L., 1971 conductivity in foods. Transaction of the ASEA, 248 (1971).
3. Ball & Olsson, 1957 Sterilization in Food Technology. Mc Graw-Hill Book Co, New York.
4. Dickerson, R.W., 1965 An apparatus for the measurement of thermal diffusivity of foods. Food Techn. 19,(5),198 (1965).
5. Katayama, K., A new method of simultaneous
Okada, M. & measurement of several thermal
Yoshida, T., 1972 properties by continuous heating. Heat Transfer-Japanese Res. 1,(1),23 (1972).
6. Hayakawa, K & New computational procedure for
Bahal, A., (1973) determining the apparent thermal diffusivity of a solid body approximated within infinite slab. J. Food Sci., 38, 623 (1973).
7. Matthews, F.V., 1966 Thermal diffusivity by finite differences and correlations with physical properties of heat treated potatoes. Ph.D. Thesis, Michigan State University, East Lansing (1966).
8. Dagerskog, M. & Pan frying of meat patties.
Bengtsson, N., 1974 Relationship among crust formation, yield, composition and processing conditions. Lebensm.-Wiss.u.Technol., 7, 202 (1974).
9. Dagerskog, M. & Utveckling av en kontroll- och
Engwall, P., 1973 styrenhet för processtemperatur vid matberedningsförsök vid SIK. SIK:s Service-Serie Nr 432 (1973).
10. Rubanik, W. et al Effekten av korvfärsens parvisa
(1970) och kemiska komponentförändringar på dess värmefysiska karaktäristika. Mjasv. Ind. SSR, 2, 31 (1970).

11. Riedel, L., 1969 Measurements of thermal diffusivity on foodstuffs rich in water. Kältetechnik-Klimatisierung, 21,(11), 315 (1969).
12. Perry, 1963 Chem. Eng. Handbook. Mc Graw Hill, Tokyo, Uppl. 4, 3:70 (1963).
13. Tschubik, I.A. & Maslow, A.M., 1973 Wärmephysikalische Konstanten von Lebensmitteln und Halbfabrikaten. VEB Fachbuchverlag, Leipzig (1973).
14. Sörenfors, P., 1976 Grundläggande arbete rörande värmebehandling av livsmedel. STU-rapport (1974).
15. Krischer, O., 1963 Die wissenschaftliche Grundlagen der Trocknungstechnik. Springer-verlag, Berlin (1963).
16. Rosenberg, D., 1969 Methods for the numerical solution of partial differential equations. Elsevier, New York (1969).

Tabell 1. Grundvärden Δu (mm).

Temp. (°C)	Recept 1			Recept 2			Recept 3			Recept 4		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
30	116	126	106	115	105	120	130	120	121	122	128	117
45	115	125	106	115	104	118	128	117	121	119	127	118
60	119	128	110	119	109	124	131	119	124	123	127	120
75	120	129	112	119	113	126	132	120	126	128	131	123
90	121	131	113	121	113	128	135	123	128	128	132	124
Vikt Tom (mg)	24,49	24,56	24,56	24,44	24,34	24,35	24,31	24,63	24,59	24,75	24,33	24,74
Vikt Fyllt (mg)	30,20	31,31	29,60	30,21	29,15	30,56	31,26	30,55	30,76	30,92	31,24	30,66

Temp (°C)	Recept 5			Recept 6			Vatten			
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	4
30	126	138	135	137	102	116	146	117	177	92
45	127	137	133	138	102	118	145	118	179	92
60	130	140	138	143	104	121	149	119	182	94
75	132	144	141	144	105	125	151	120	182	95
90	134	145	143	146	107	125	152	122	185	96
Vikt Tom (mg)	24,71	24,38	24,71	24,88	24,38	24,62	24,58	24,64	24,46	24,68
Vikt Fyllt (mg)	31,36	32,07	32,03	32,68	28,74	30,51	31,72	29,27	34,18	27,30

Tabell 2. Mätning på tom kapsel, Δu . (mm)

1	2	3	4	5	6	medelvärde	totalt medelvärde
61	61	58	59	59	61	59,8	60
59	59	58	59	59	58	58,7	
62	62	59	61	60	59	60,5	
61	60	59	60	61	61	60,3	
62	62	59	61	61	61	61,0	

Tabell 3. Beräknade värden Δu_{red} (mm)

Temp (°C)	Recept 1			Recept 2			Recept 3			Recept 4		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
30	56	66	46	55	45	60	70	60	61	62	68	57
45	56	65	46	55	44	58	68	57	61	59	67	58
60	59	68	50	59	49	64	71	59	64	63	67	60
75	60	69	52	59	53	66	72	60	66	68	71	63
90	61	71	53	61	53	68	75	63	68	68	72	64
Prov- mängd (mg)	5,71	6,74	5,04	5,77	4,81	6,21	6,95	5,92	6,17	6,17	6,91	5,9

Temp (°C)	Recept 5			Recept 6			Vatten			
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	4
30	66	78	75	77	42	56	86	57	117	32
45	67	77	73	78	42	58	85	58	119	32
60	70	80	78	83	44	61	89	59	122	34
75	72	84	81	84	45	65	91	60	122	35
90	74	85	83	86	47	65	92	62	125	36
Prov- mängd (mg)	6,65	7,69	7,32	7,80	4,36	5,89	7,14	4,63	9,72	2,62

Tabell 4. Värmekapacitet för vatten (J/kg, °C) (ref. Perry sid. 3-123)

Temp. (°C)	
30	4175
45	4176
60	4180
75	4190
90	4201

Tabell 5. Konstanten $k \cdot v \cdot 10^{-3}$ (mm · °C/J)

Temp (°C)	1	2	3	4	Medelv.
30	2,88	2,95	2,88	2,93	2,91
45	2,85	3,00	2,93	2,92	2,92
60	2,98	3,05	3,00	3,10	3,03
75	3,04	3,09	3,00	3,19	3,08
90	3,07	3,19	3,06	3,27	3,15

Tabell 6. Beräknade c_p -värden (J/kg, °C)

°C	Recept 1			MV	Recept 2			MV
30	3370	3365	3136	3290	3276	3215	3320	3270
45	3299	3303	3126	3243	3264	3133	3199	3199
60	3410	3330	3274	3338	3375	3362	3401	3379
75	3412	3324	3350	3362	3320	3578	3451	3450
90	3391	3344	3338	3358	3356	3498	3476	3443

°C	Recept 3			MV	Recept 4			MV
30	3461	3483	3397	3447	3453	3382	3309	3381
45	3351	3297	3386	3345	3275	3321	3355	3317
60	3372	3289	3423	3361	3370	3200	3345	3305
75	3364	3291	3473	3376	3578	3336	3455	3456
90	3426	3378	3499	3434	3499	3308	3432	3413

°C	Recept 5			MV	Recept 6			MV
30	3411	3486	3521	3473	3392	3310	3267	3323
45	3450	3429	3415	3431	3425	3299	3372	3365
60	3474	3433	3517	3475	3512	3406	3418	3445
75	3515	3547	3593	3552	3497	3351	3583	3477
90	3533	3509	3600	3547	3500	3422	3475	3466

Tabell 7 Resultat från bestämningen av temperaturledningstalets
temperatur och receptberoende

Recept nr	Vatten Fett	Försök nr	α_0 -värde ($\text{m}^2/\text{s} \cdot 10^{-7}$)	Lutnings- koeff. $\cdot 10^{-10}$ ($\text{m}^2/\text{s} \cdot ^\circ\text{C} \cdot 10^{-10}$)	Stand. avvikelse
1	59.41	24	0.961	8.10	0.39
	17.29	30	1.035	6.62	0.22
			1.00 ± 0.05	7.36 ± 1.05	
2	61.83	20	0.906	11.70	0.71
		21	1.002	8.40	0.46
	14.47	25	1.218	3.68	0.15
			1.04 ± 0.16	7.93 ± 4.03	
3	64.29	19	1.169	7.33	0.18
		22	1.074	7.80	0.44
	11.05	29	1.042	6.82	0.27
			1.09 ± 0.07	7.31 ± 0.49	
4	66.63	14	1.254	6.51	0.37
		15	1.116	8.302	0.38
	7.42	28	1.206	6.202	0.30
			1.19 ± 0.07	7.00 ± 1.13	
5	68.85	13	1.153	8.51	0.41
		16	1.285	5.52	0.18
	5.19				
			1.22 ± 0.09	7.02 ± 2.11	
6	71.34	17	1.189	9.00	0.32
		18	1.319	7.70	0.31
	1.42	27	1.389	5.09	0.21
			1.30 ± 0.19	7.26 ± 1.99	
				7.33 ± 1.83	

Fig. 1. Värmekapacitet för köttfärs.

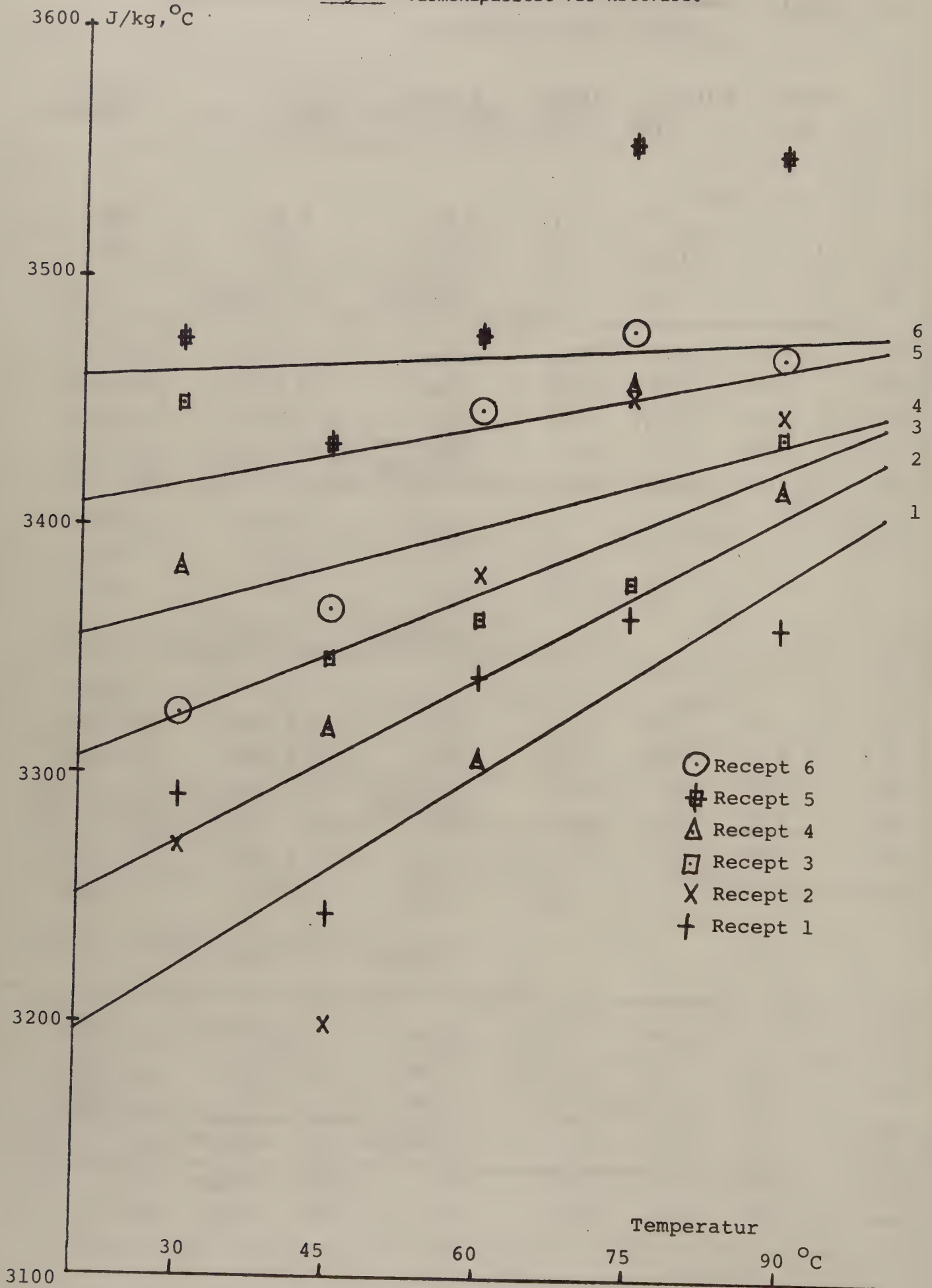


Fig. 2. Principskiss över stekhäll.

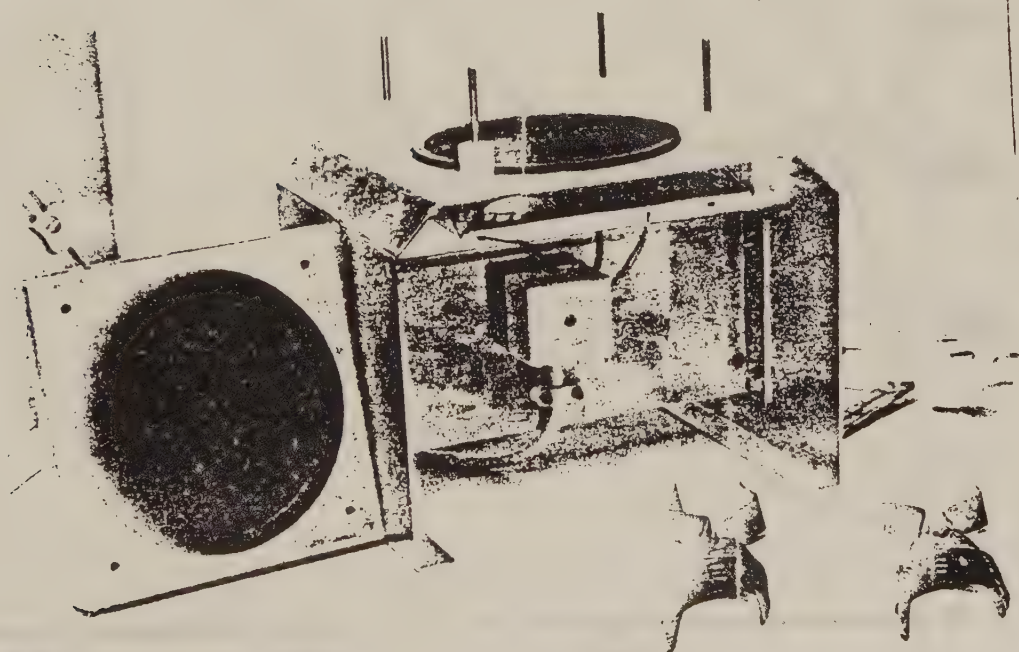
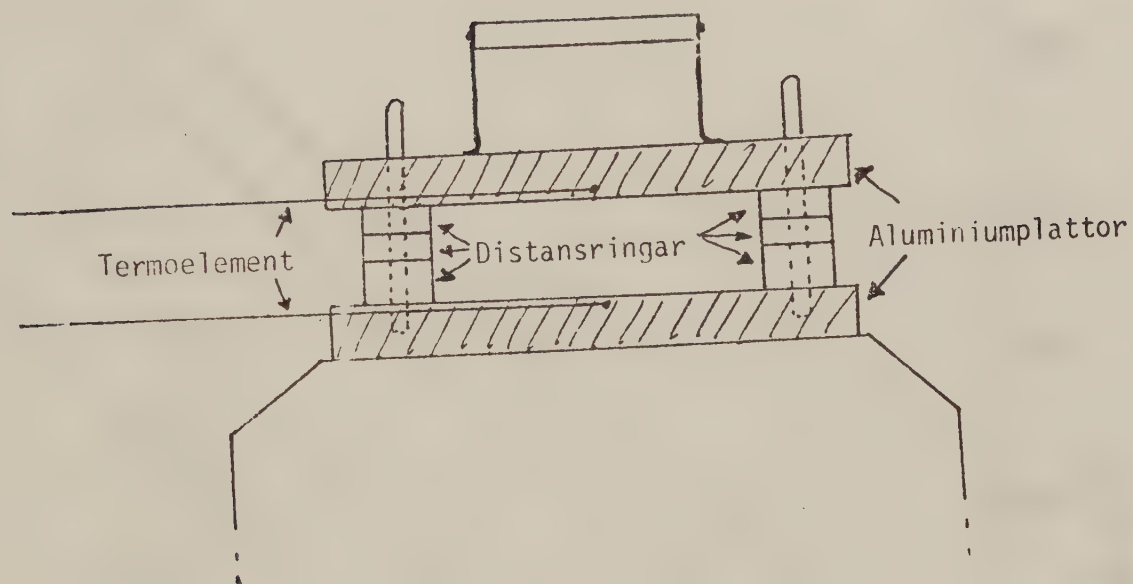


Fig. 3. Exempel på tid-temperaturförloppet under ett försök.

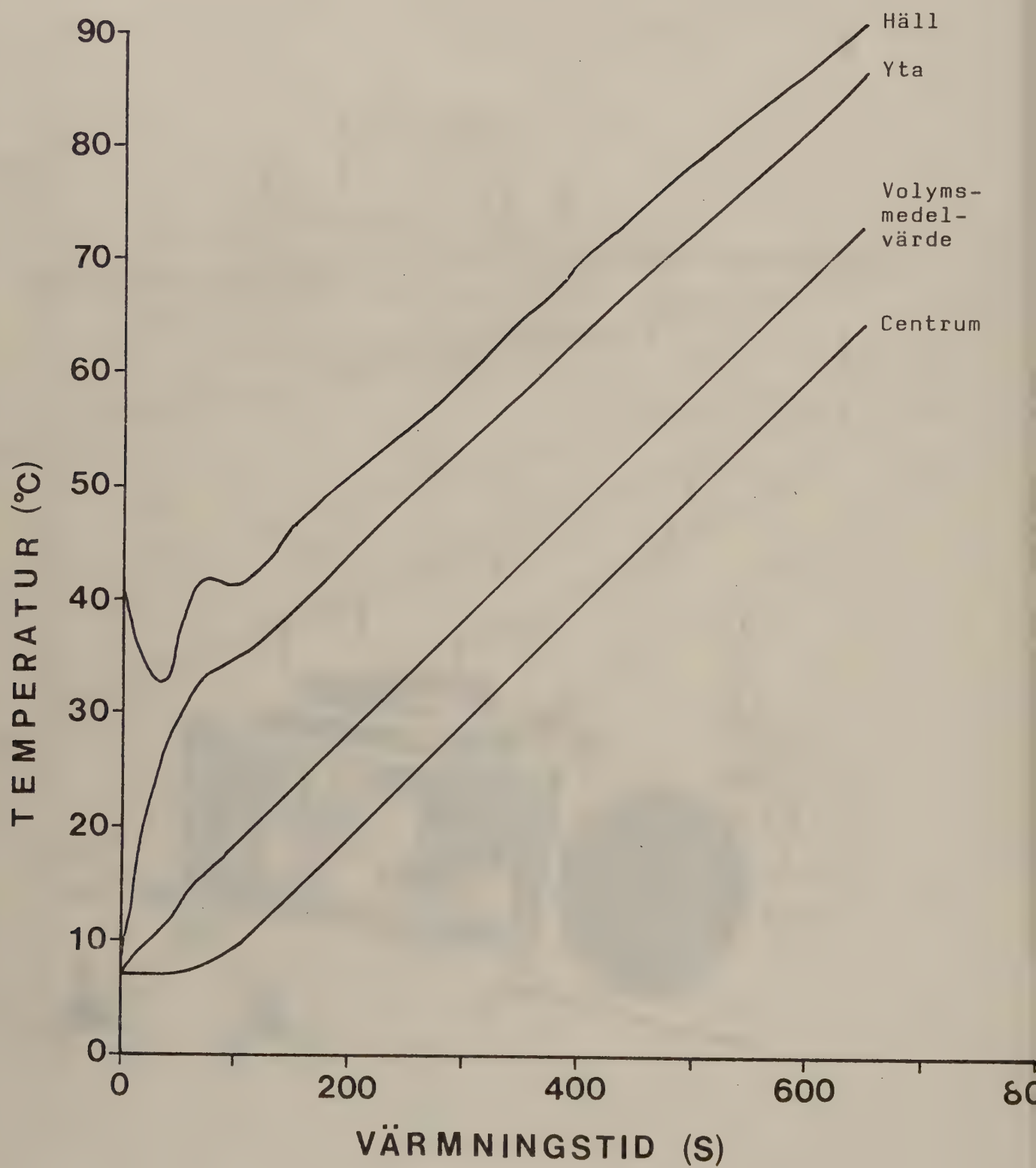


Fig. 4. Minsta kvadratanpassning av temperaturledningstalets temperaturberoende. (Försök nr 22)

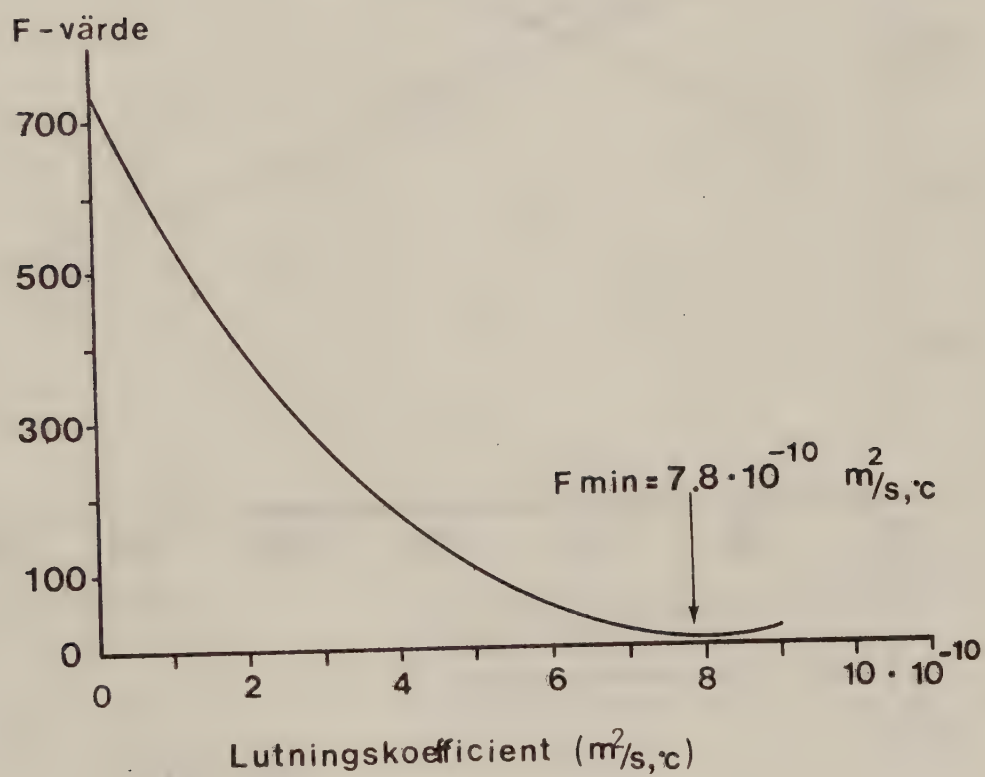


Fig. 5. Temperaturledningstalets temperaturberoende som funktion av uppvärmningshastigheten.

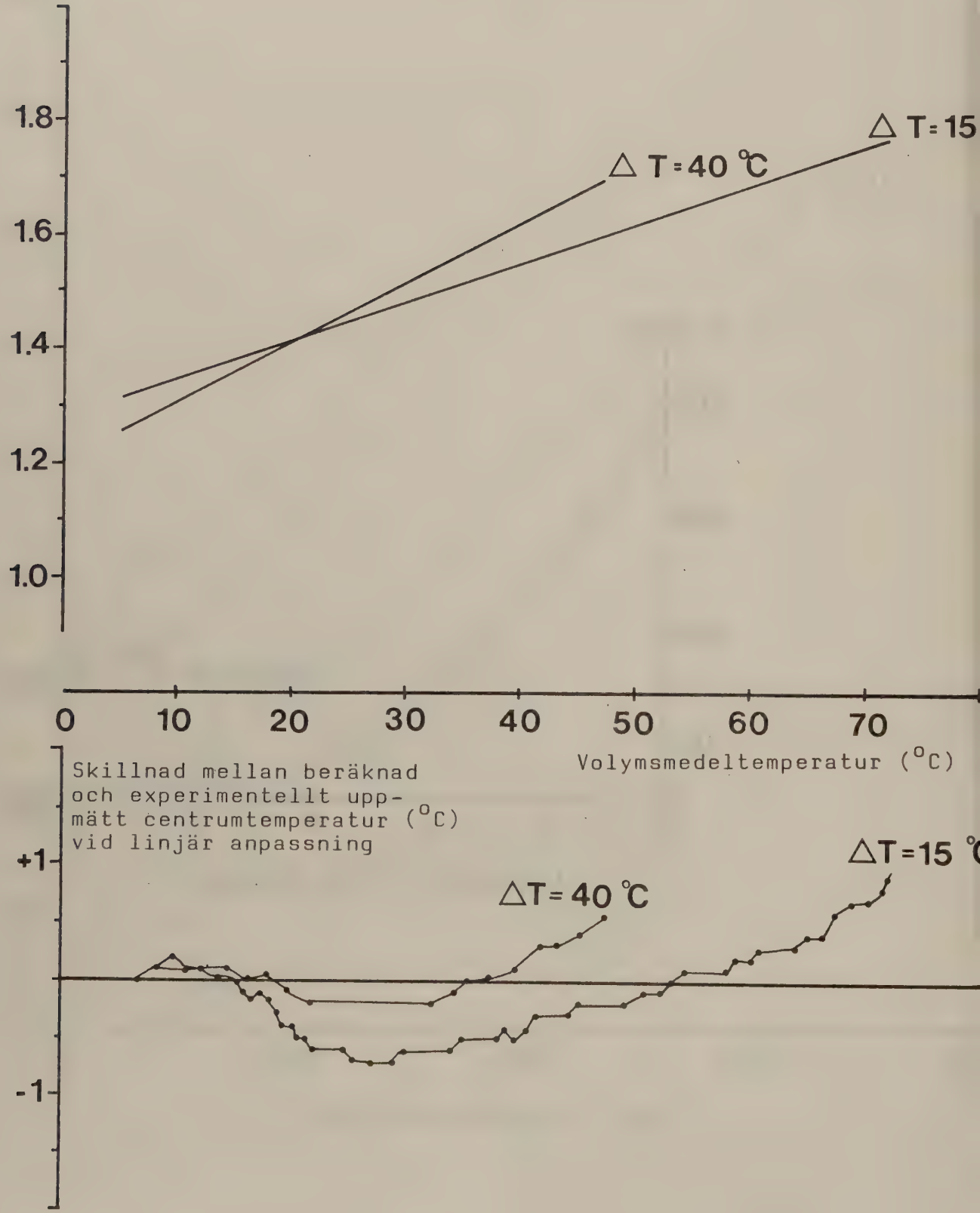


Fig. 6. Temperaturledningstalets temperaturberoende för recept nr 2. (3 replikat nr 20, 21 och 25).

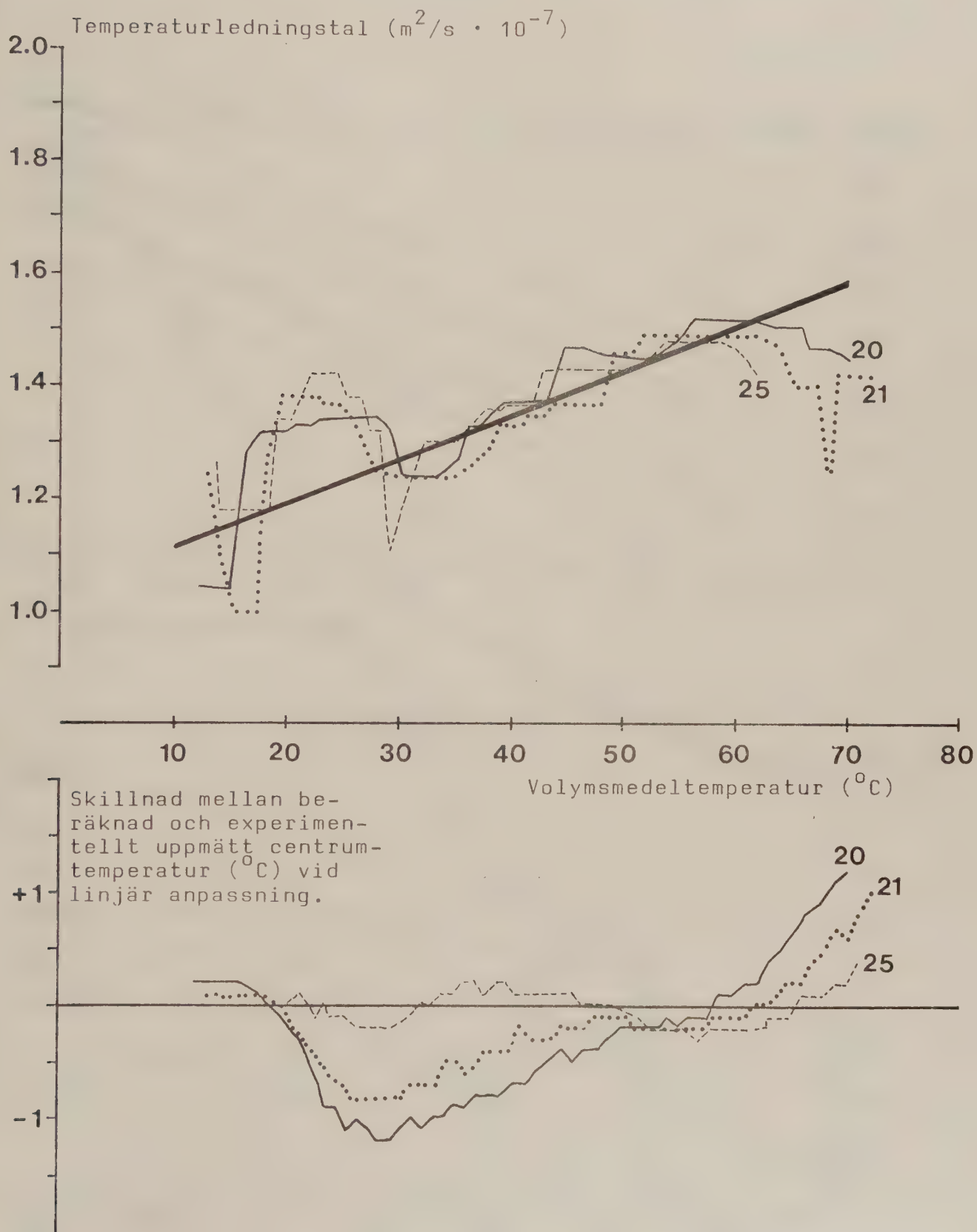


Fig. 7a, b. Temperaturledningstalets temperatur-receptberoende.

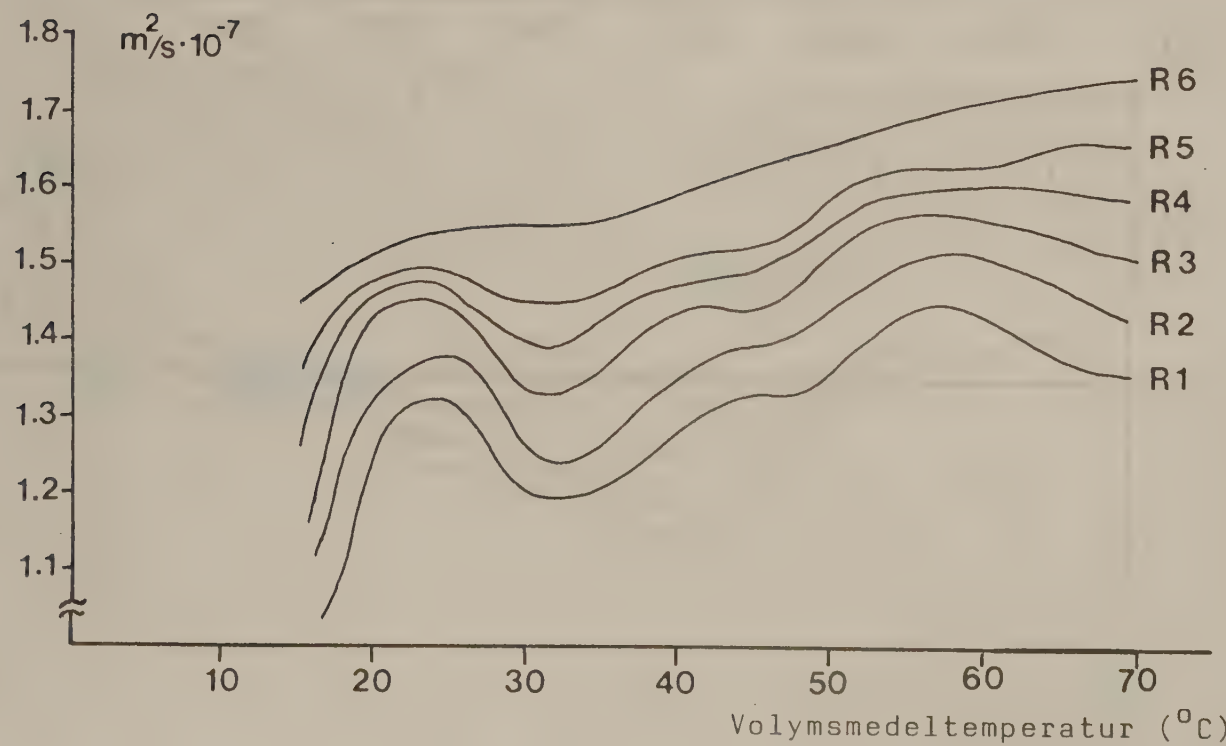
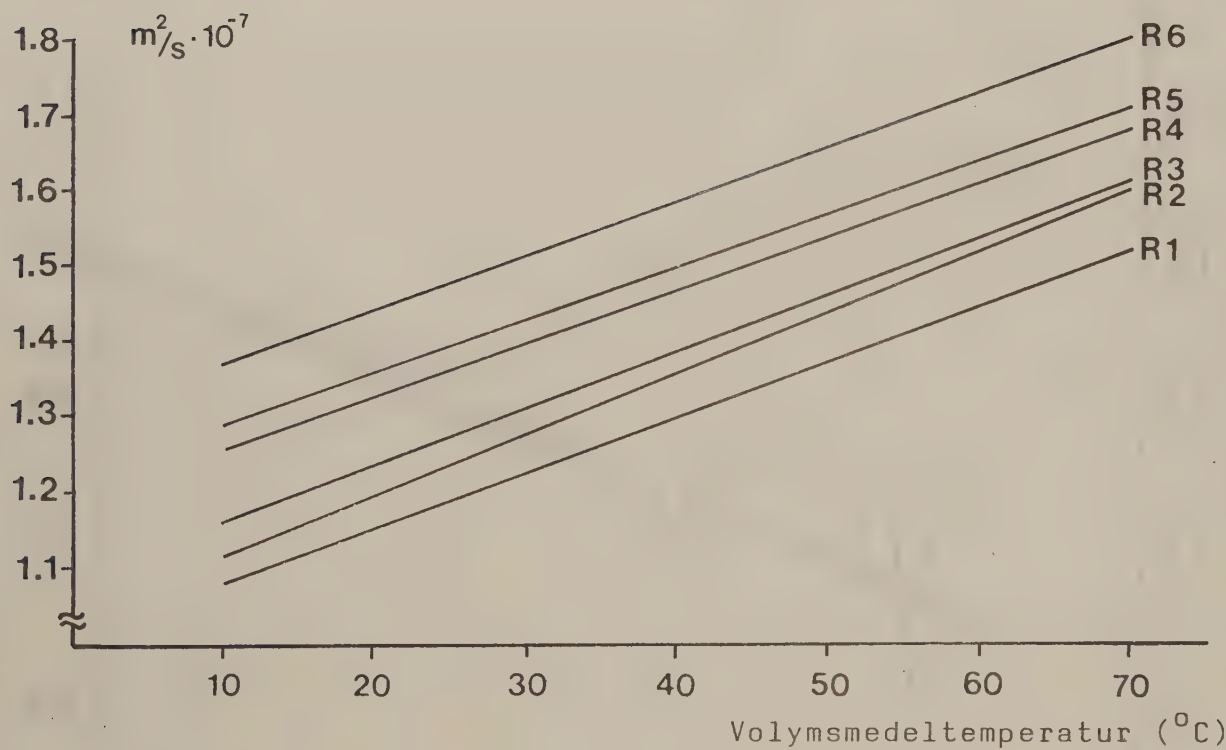


Fig. 8. Värmeledningstalet för blandningen fett-vatten.

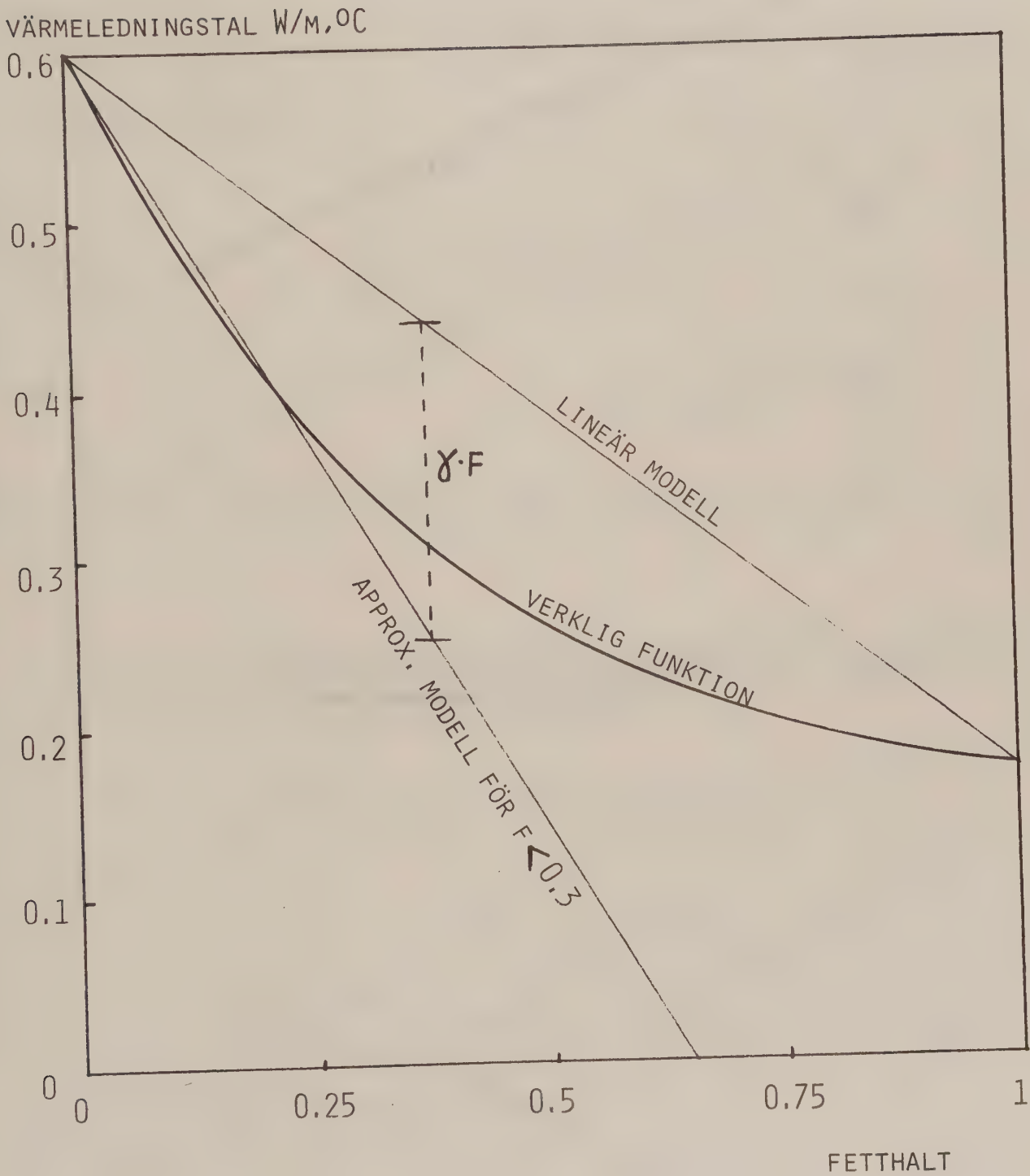
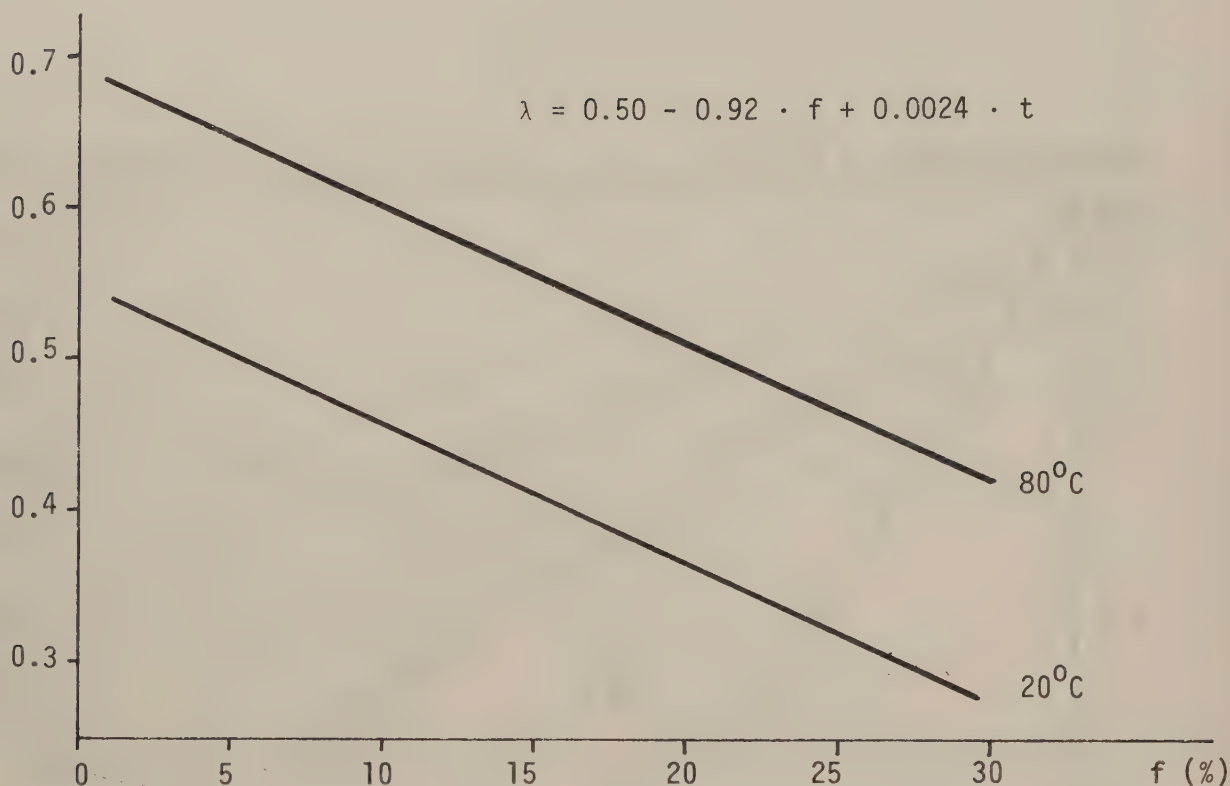


Fig. 9a. Värmeledningstalets (λ) beroende av fetthalt (f) och temperatur (t). Gäller för TS-halter mellan 20 och 30 %.

λ (W/m, °C)



(kg/m³)

Fig. 9b. Densitetens (ρ) beroende av fetthalt (f), vattenhalt (w) och temperatur (t). Gäller för TS-halter mellan 20 och 30 %.

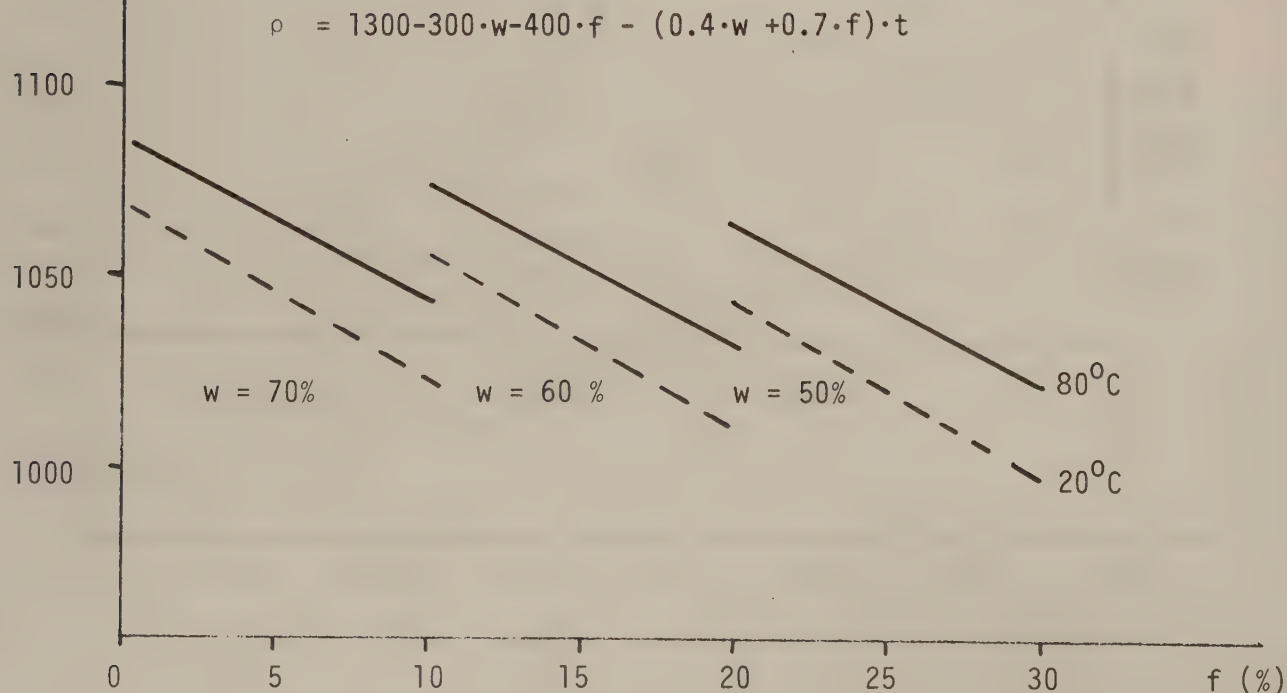


Fig. 9 c. Specifika värmets (c_p) beroende av fetthalt (f), vattenhalt (w) och temperatur (t). Gäller för TS-halter mellan 20 och 30 %.

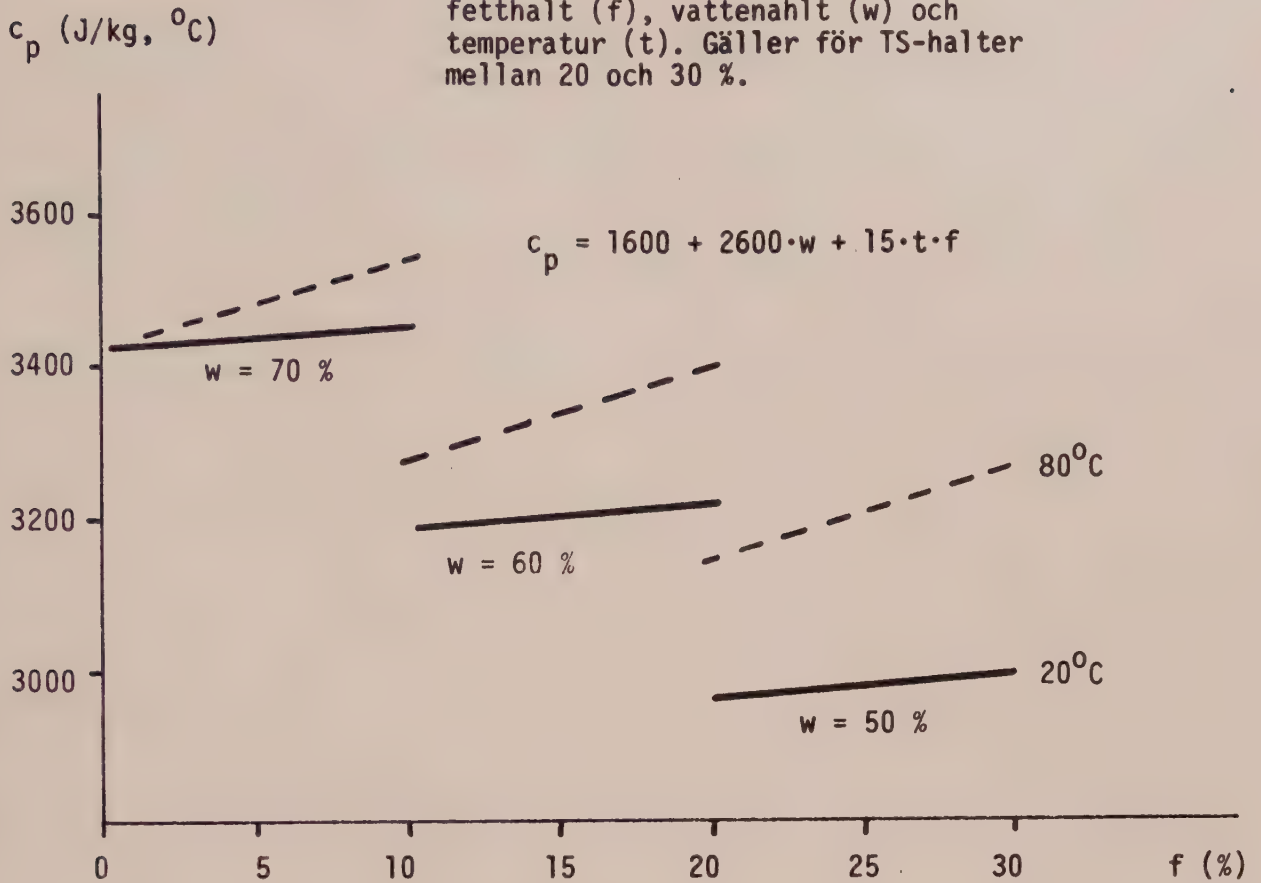
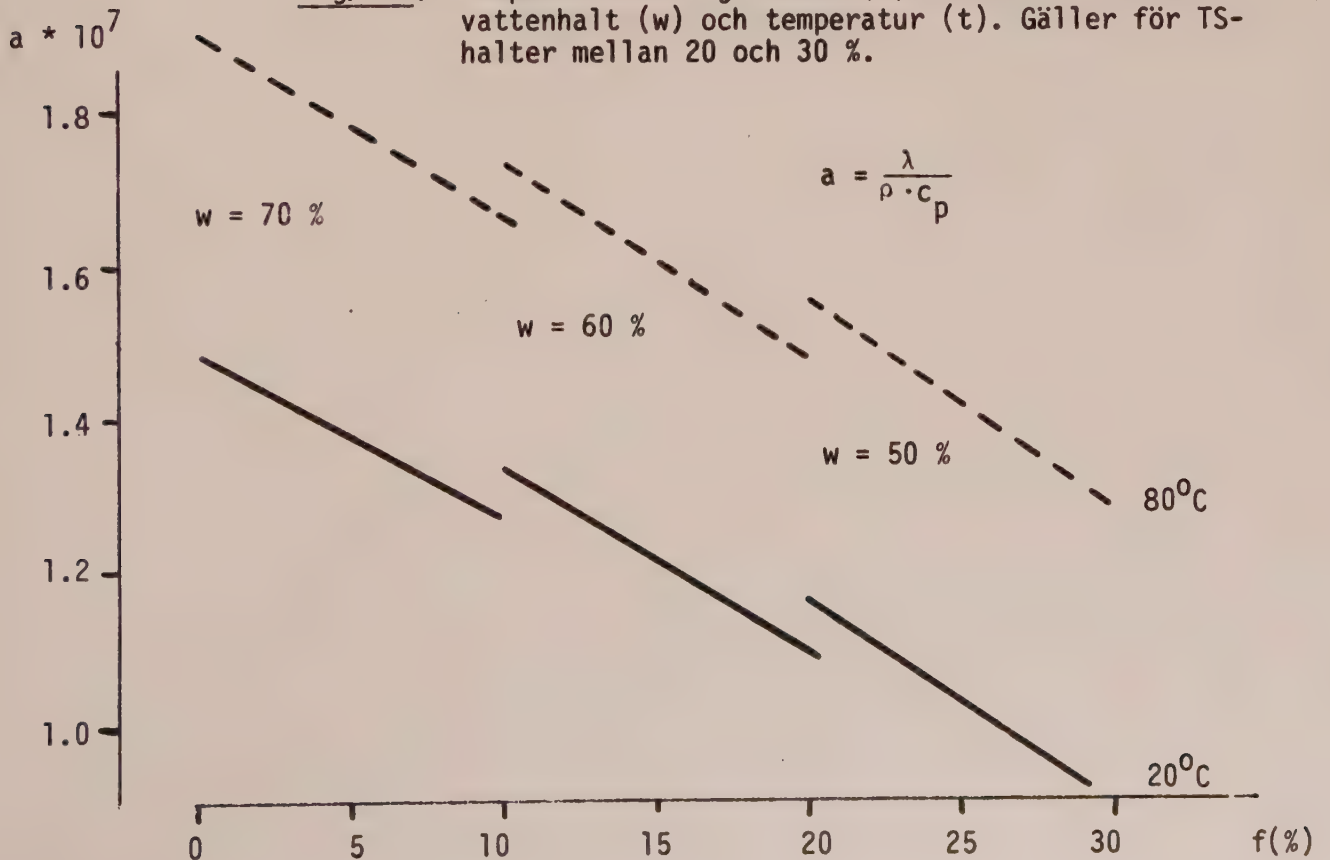


Fig. 9 d. Temperaturledningstalets (a) beroende av fetthalt (f), vattenhalt (w) och temperatur (t). Gäller för TS-halter mellan 20 och 30 %.



A COMPARISON BETWEEN FOUR DIFFERENT METHODS OF
FRYING MEAT PATTIES

Part one - Heat transfer, yield and crust formation

Magnus Dagerskog
SIK - The Swedish Food Institute
Fack
S-400 23 GÖTEBORG

Per Sörenfors
Department of Food Engineering
Lund Institute of Technology
Box 50
S-230 53 ALNARP

A COMPARISON BETWEEN FOUR DIFFERENT METHODS OF FRYING MEAT PATTIES

1. Heat transfer, yield and crust formation

By Magnus Dagerskog and Per Sörenfors

SIK - The Swedish Food Institute
Fack, S-400 23 Göteborg, Sweden

ABSTRACT

By experiments on a laboratory scale the four frying methods deep fat, contact, long wave IR and convection frying have been compared for minced meat patties made from two different recipes. The intention was to determine the influence of different process parameters on the resulting product quality. For each frying method used, four frying "intensity levels" (fat temperature, pan temperature, IR-flux and air temperature) within the useful range were chosen. Frying time, surface brightness and weight losses were studied as a function of centre temperatures between 40 and 90°C. The texture of meat patties heated to 65°C centre temperature was also determined.

As expected, the results show that a higher intensity level gives more rapid heating of the product, except for double-sided contact frying. The colour formation as well as the losses increase rapidly with time and intensity level. Great differences were found between the two recipes, where patties made from recipe 2, containing more lean meat, needed longer frying times, gave higher losses and lower brightness values. Attempts were also made to calculate the actual heat transfer coefficients to be able to compare the frying methods more adequately and as a basis for simulation.

In conclusion, these frying experiments have shown that the four methods examined give very nearly equivalent results if optimal frying conditions are used for each method.

INTRODUCTION

For the industrial frying of meat products, deep fat, contact, IR (infra-red radiation) and convection heating are in practical use today. Of these methods deep fat frying is the most common, combining high capacity and flexibility with simplicity of performance. Inherent problems are, however, fat uptake and thermal fat degradation, which have a negative effect on the sensory and nutritional quality. Therefore, the alternatives of continuous frying are gaining increasing interest.

With this background, it is most important that investigations are made, comparing these methods under well defined conditions, as a basis for the selection and optimization of frying processes. Visser et al. (1960) studied heat penetration and cooking losses of beef roasts during oven roasting at 150°C and deep fat frying at 100 and 110°C to an internal temperature of 55° , 70° or 85°C . Deep fat frying required only one half to one third of the cooking time needed for oven roasting. In general, the average cooking time and cooking losses increased significantly with increasing internal temperature. McCrae and Paul (1974) found that decreasing rate of heat penetration in oven broiling (204°C), braising and roasting (163°C) of 25 mm thick steaks caused increasing breakdown in collagenous tissue. For 10 mm meat patties Bengtson and Jakobsson (1974) compared deep fat frying, short wave IR-heating and pan frying. They found that deep fat frying, at oil temperatures normally used, is the fastest frying method, combining speed with good appearance but also giving lower yield and higher fat content. IR-heating (single-sided) was the second fastest method, with the lowest resulting fat content. With the equipment used, results were quite sensitive to small variations in

voltage and heating time, the yield decreasing sharply with increasing product centre temperature. Pan frying was the slowest heating method of all but gave higher yield than deep fat frying with lower fat uptake.

From the viewpoint of the heat-transfer theory, the main differences between the common frying methods were discussed by Hallström and Sörenfors (1975). Basic studies of time-temperature lapse during deep fat frying were reported by Sörenfors (1974). For double-sided contact frying, Dagerskog and Bengtsson (1974) found a reproducible and well defined relationship among crust colour formation, yield, pan temperature and heating time for a given recipe, sample thickness and contact pressure. Crust colour changes and weight loss increased regularly with frying time and pan temperature. Rate of heat penetration was, however, almost independent of pan temperature above 140°C.

The objective of the present investigation was to compare, on a laboratory scale, deep fat frying, contact frying, long wave IR-frying and convection frying and to determine, for each method, the influence of different processing parameters on heat transfer, weight losses and crust formation. The results obtained may be used as a basis for equipment design and process optimization.

EXPERIMENTAL

Raw material

For the frying experiments meat patties made from two different recipes were chosen. The first one (recipe 1) was an industrial recipe and called for 60% beef and pork plus potatoes, bread crumbs, milk powder and salt to a total of 65.4% water and 12.9% fat content.

The other (recipe 2) was of a common household type, composed of 82% beef and pork plus bread crumbs and salt to a total of 63.3% water and 12.5% fat content.

Meat patties were formed in a Hollymatic (model 54) forming equipment to 10-11 mm thickness and 65 g weight, frozen in a blast freezer at -35°C and stored under nitrogen in flexible pouches at -40°C . Before the frying experiments started, the patties were thawed in a refrigerator at $+5^{\circ}\text{C}$ during 16 hours.

Frying equipment

The frying experiments were conducted with laboratory equipment of our own design under well defined conditions.

Deep fat fryer

The fryer shown in principle in figure 1 held 10 l of fat (hydrogenated frying fat), which was circulated with a horizontal speed of about 0.2 m/s. The fat temperature was maintained within $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$.

Double-sided contact fryer

To simulate industrial contact frying between moving teflon belts, we used a double-sided contact fryer (figure 2). The temperature of the teflon-coated aluminium

pans was regulated within $\pm 2^{\circ}\text{C}$. The top heater plate was balanced to maintain a contact pressure of 200 g/meat patty. Before frying, the meat patty was coated with 2 g of melted margarine.

Infra-oven

A test oven for IR-frying was developed as shown in figure 3. The electrically heated steel-rods radiated IR-energy at emission maximum of about $3\ \mu\text{m}$. The total power of the two IR-modules was 8 kW. The IR-flux at the product surface was regulated between 10 and $30\ \text{kW/m}^2$, simply by changing the distance between the heating source and product. The meat patties were placed on a leaning stainless net, preventing drip from falling on the lower IR-module. White ceramic material was used for reflectors. No fat was spread on the meat patties before IR-frying.

Convection oven

For the experiments with forced convection a special tunnel oven (figure 4) was designed (Skjöldebrand, 1976) permitting instantaneous change of the air flow direction and continuous variation of air velocity from 2 to 12 m/s and air temperature from 20 to 400°C . The electric power of the heating unit was 15 kW, and steam could be supplied to regulate the humidity of the circulating air. The frying experiments were accomplished without extra fat on the meat patties.

Temperature measurement

The temperature lapse at the centre of the meat patties was registered by means of thin Copper/Constantan thermocouples (diameter 0,5 mm) sewn into the patties from the side. The position of the thermocouple was checked after the frying experiments. At least three replicates were made for sufficient accuracy in the measurements ($\pm 2^{\circ}\text{C}$).

Colour measurement

The crust colour formation during frying was followed by measurements of brightness. Two instruments were used, namely a Hunterlab Colour & Colour Difference Meter and an Elrepho Colour Measurement Unit. For calibration of the two instruments common permanent calibration standards were used.

The brightness of the surface crust of the meat patties was measured 5 minutes after removal from the frying equipment. The brightness values presented are defined according to the DIN-standard.

Measurement of weight losses

The total weight loss during frying was determined 3 minutes after removal from the frying equipment. In some experiments water and fat contents of raw and cooked meat patties were determined in order to separate total losses into water and fat losses. All losses are expressed in per cent of raw weight before any coating with fat.

Texture measurement

The fried patties were analysed by means of an Instron Universal Testing Machine according to the method reported by Andersson (1975). A strip, 45 mm wide and 60 mm long, was cut out of the patties and placed on a meat shear-cell. This cell consists of a stand in which a vertical running plate moves. During measurements the material was deformed with a speed of 1 cm/min. The force/deformation curve was registered, and the deformation work was calculated by a built-in integrator.

Experimental plan

For each frying method, four frying intensity levels (fat temperature, pan temperature, IR-flux and air temperature) were chosen in order to facilitate optimization within methods. The proper selection of intensity levels within the useful range was tested by preliminary experiments.

The following intensity levels were chosen:

Method	Frying variable	Intensity levels
Deep fat	fat temperature	130, 150, 170 and 190°C
Contact	pan temperature	150, 170, 190 and 210°C
Long wave IR	IR-flux	15, 18, 21 and 25 kW/m ²
Convection	air temperature	200, 250, 300 and 350°C

During the IR-frying experiments the IR-flux (kW/m²) was regulated by changing the distance between the IR-radiators and the product (13, 11, 9 and 7 cm).

To get enough crust colour formation during convection frying of meat patties, one has to use a combination of high oven temperature (200-350°C) and air velocity (10 m/s). At such high temperatures the relative humidity of the air is very low (<0.5%) and has no influence on frying time or water loss. Oven temperature was chosen as the most realistic frying variable, while air velocity was kept constant.

For the 4 frying methods x 4 intensity levels x 2 recipes the following measurements were made:

- . Centre temperature as a function of time. Five replicates.
- . Weight loss and brightness for frying to six different centre temperatures (40, 50, 60, 70, 80 and 90°C). Two replicates.
- . Weight loss, brightness and texture for frying to 65°C centre temperature. This temperature was considered to be a realistic end temperature of a cooked product. During after-heating the centre temperature of the meat patties normally rises an additional 10°C. For the contact and IR-fried patties the fat losses were also taken into account to make possible a separation of total losses into water and fat losses. Three replicates.

RESULTS

Rate of heat penetration

In figure 5 the results from the temperature measurements between 40 and 90°C are shown for the four frying methods and both recipes, leaving out the individual points for clarity. From these diagrams the following conclusions may be drawn:

- o For all frying methods a higher intensity level causes a faster temperature response. However, for contact frying the difference is very small compared with that of the other methods.
- o The frying time to reach the same centre temperature differs among the methods approximately in the following way:
 Recipe 1: contact < deep fat = IR = convection
 Recipe 2: contact < deep fat = convection < IR
- o The centre temperature rise is faster for recipe 1 than for recipe 2. This is especially true for IR-frying where the difference between the two recipes in frying time is about 100%.

Weight loss function and crust colour formation

In figure 5 the results from the weight loss and crust colour measurements are also presented. The diagrams show that a higher intensity level results in greater losses and darker crust colour compared to those of a lower level. The difference between succeeding steps of intensity levels is greatest for deep fat frying and smallest for contact frying. Recipe 1 is more sensitive to changes in intensity level with regard to brightness and recipe 2 with regard to weight loss.

To investigate the difference between recipes, we performed a separate experiment, where fat losses were determined as a function of centre temperature. For contact frying the results shown in figure 6 were found. The results indicate a much better fat-binding capacity for recipe 1

than for recipe 2. The negative values for recipe 1 result from the initial fat addition. Similar differences between the two recipes were found for IR-frying.

Rate of heat transfer

As a basis for this calculation of heat transfer during frying, the experimentally determined frying times, weight losses and brightness values from figure 5 can be used. However, the calculations must be restricted to recipe 1 with no fat losses, good water-binding capacity and low tendency towards swelling. For this recipe the determined weight losses can be set approximately equal to losses of evaporated water from the crust.

The calculations were based on the measurements at centre temperatures of 60 and 70°C so that steady-state conditions could be assumed. For a comparison of the frying methods at equal conditions, intensity levels giving equal surface brightness ($\sim 14\%$) at 65°C centre temperature were chosen.

During frying an almost dry surface crust of increasing thickness is formed, which is limited inwards by the 100°C evaporation zone. In the centre temperature interval from 60 to 70°C the calculated thickness of the dry crust is around 0.4 mm for this recipe. Besides the heat transfer needed to evaporate the water in the crust, the temperature of the inner wet core of the meat patty has to be raised by 6.4°C on the average, which is calculated by integration from the sinusoidal temperature distribution between the 60 and 70°C centre temperatures. For meat patties of 11 mm thickness and 84 mm diameter with a total weight of 65 g, approximate values of heat transfer were thus calculated as shown in table 1.

Obviously, more energy is absorbed at equal surface colour during convection heating. This is probably due to overheating of the edges of the patty during convection heating. The colour measurements at the bottom and top surfaces are not influenced by the edge effect, and for that reason we found that a mean value of 13 kW/m^2 could be chosen for the following calculation of approximate heat transfer coefficients.

From the heat transfer equation it is possible to calculate the heat transfer coefficient if the surface temperature is known or vice versa. In separate experiments surface temperature during contact frying was measured by means of thin thermocouples (Dagerskog and Bengtsson 1974) and during convection frying with an IR-pyrometer (Raytek LC814). For deep fat frying no measurements were possible, but the surface temperature should be close to that in convection heating under conditions giving almost the same frying time ($\sim 120 \text{ s}$) to 65°C centre temperature. Contact heating is much faster (93 s), therefore demanding a higher surface temperature. The actual surface temperature during contact heating is not equal all over the surface because of the variation of heat transfer to different spots giving alternating dark and bright areas. This calculation is therefore an attempt to estimate the overall heat transfer coefficient (table 1).

Comparison at 65°C centre temperature

For a final centre temperature of 65°C the resulting weight losses (figure 7) and brightness values (figure 8) are shown. The following conclusions can be drawn:

- o Weight losses are much higher for recipe 2 than for recipe 1.

- o Among the methods the following tendency as to weight losses was found:
 Recipe 1: Deep fat = IR = convection > contact
 Recipe 2: Deep fat = IR > convection = contact
- o For brightness, contact frying differs from the other methods in that brightness for recipe 1 is higher than for recipe 2 for all intensity levels.

After frying to 65°C centre temperature, the texture of the meat patties was also measured in a meat shear cell. The calculated deformation work showed no significant difference between the four intensity levels of each method. The results in table 2 indicate that patties made from recipe 1 are more "tender" than those made from recipe 2.

DISCUSSION

Great differences were found between the two recipes, where the patties of recipe 2, containing more lean meat, needed longer frying times and gave higher losses and lower brightness values. Because of the lower meat content and added water and fat binding ingredients in recipe 1, the initial surface colour is much brighter than that of recipe 2. This difference in composition also influences the tendency towards swelling during frying which is more pronounced for recipe 2, contributing to the longer frying times needed. During IR-frying, the low fat-binding capacity of recipe 2 strongly influenced the frying time because of the reflecting surface conditions established by fat and water leakage. The higher deformation work needed to compress patties of recipe 2 in comparison with those of recipe 1 is probably due to the higher losses during frying, differences in meat content and degree of grinding.

Independent of frying method, almost the same frying time and surface colour could be obtained by selecting the proper intensity level. For guidance in this selection the determined heat transfer coefficients can be used for recipe 1.

When the heat transfer conditions are known, it is also possible to calculate the evaporative water losses at any desired temperature of the heating medium.

In spite of the similarities between methods in heat transfer to the surface, the rate of heat penetration during contact frying differed markedly, in that it was independent of intensity level. This may be due to the contact pressure applied, preventing heat transport by internal steam convection, which otherwise contributes to the heat transfer according to Sörenfors (1977). The experiments also show that heat transfer during IR-frying is very dependent on the absorption characteristics of the surface of the meat patty, which is changing both with recipe and frying time.

In part two of this work the sensory quality of the fried patties was determined for the same four frying methods and two recipes. The optimal frying intensity levels for each method are selected, and a comparison between the methods is made.

ACKNOWLEDGEMENTS

Thanks are due to Mr. Anders Änäs, Lund's Institute of Technology and Mrs. Ulla Gustafsson, SIK, who diligently carried out much of the experimental work involved.

REFERENCES

ANDERSSON, Y., SIK-Report, 376, (1975).

BENGTSSON, N.E. and JAKOBSSON, B., Microwave Energy Applications Newsletter, 7, 3, (1974).

DAGERSKOG, M. and BENGTSSON, N.E., Lebensm.-Wiss.u.Technol., 7, 202, (1974).

HALLSTRÖM, B and SÖRENFORS, P., Fleisch, 29, 185, (1975).

MC CREA, S.E., and PAUL, P.C., J. of Food Sci., 39, (1974).

SKJÖLDEBRAND, C., Livsmedelsteknik, 364, (1976).

SÖRENFORS, P., SIK-Report, 368, (1974).

SÖRENFORS, P., Proceedings of EFCE Mini-symposium on "Mathematical Modelling in Food Processing", 7-9/8 1977, Örenäs, Sweden.

VISSER, R.Y., HARRISON, D.L., GOERTZ, G.E., BUNYAN, M., McNELISSKELTON, M. and MACKINTOSH, D.L., Food Tech., 193, (1960).

TABLE 1 RESULTS OF HEAT TRANSFER CALCULATIONS.

FRYING METHOD	INTENSITY LEVEL AT EQUAL SURFACE BRIGHTNESS (= 14 %)	HEAT TRANSFER (kW/M ²)	SURFACE TEMP (°C)	HEAT TRANSFER COEFFICIENT (W/M ² , °C)
CONTACT	210 °C	13.4	160	260 ± 50
DEEP FAT	160 °C	12.0	135	500 ± 200
IR	15 kW/M ²	13.7	-	-
CONVECTION	275 °C	17.4	135	90 ± 20

TABLE 2 TEXTURE OF MEAT PATTIES, FRIED TO 65°C CENTRE TEMPERATURE.
STANDARD ERROR: RECIPE 1: 0.03 J, RECIPE 2: 0.08 J.

FRYING METHOD	DEFORMATION WORK (J)	
	RECIPE 1	RECIPE 2
DEEP FAT	0.26	0.38
CONTACT	0.22	0.30
IR	0.34	0.39
CONVECTION	0.23	0.25

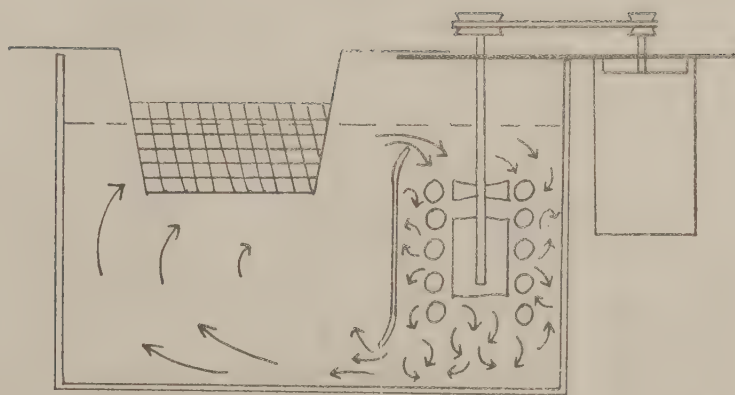


Fig. 1. Deep fat fryer

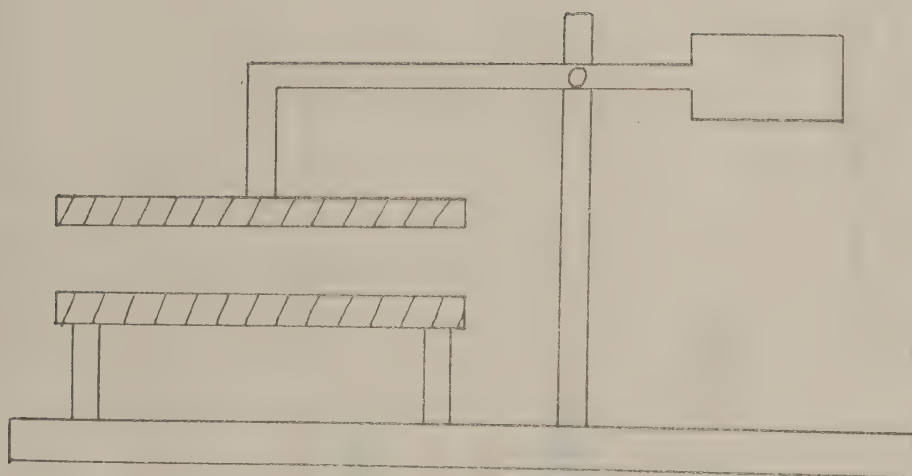


Fig. 2. Double-sided contact fryer

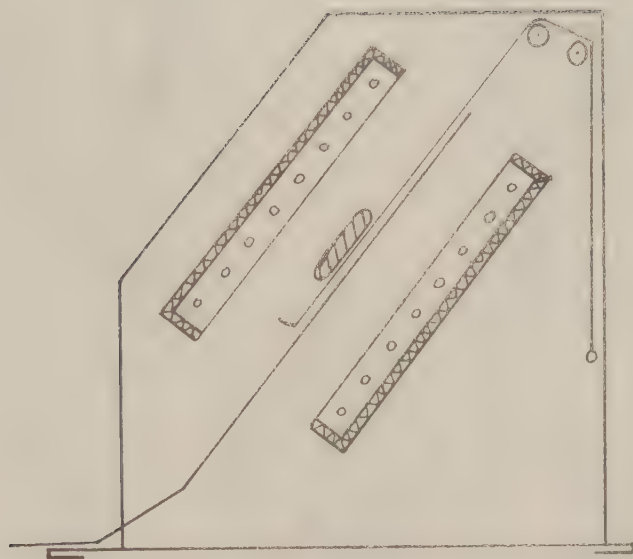


Fig. 3. IR-oven

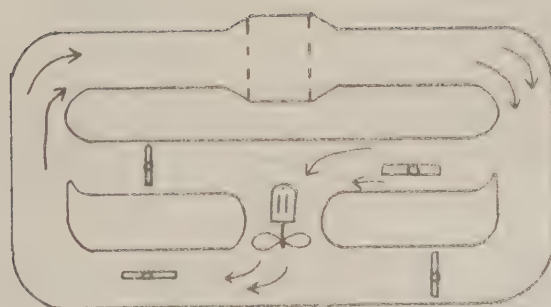


Fig. 4. Convection oven

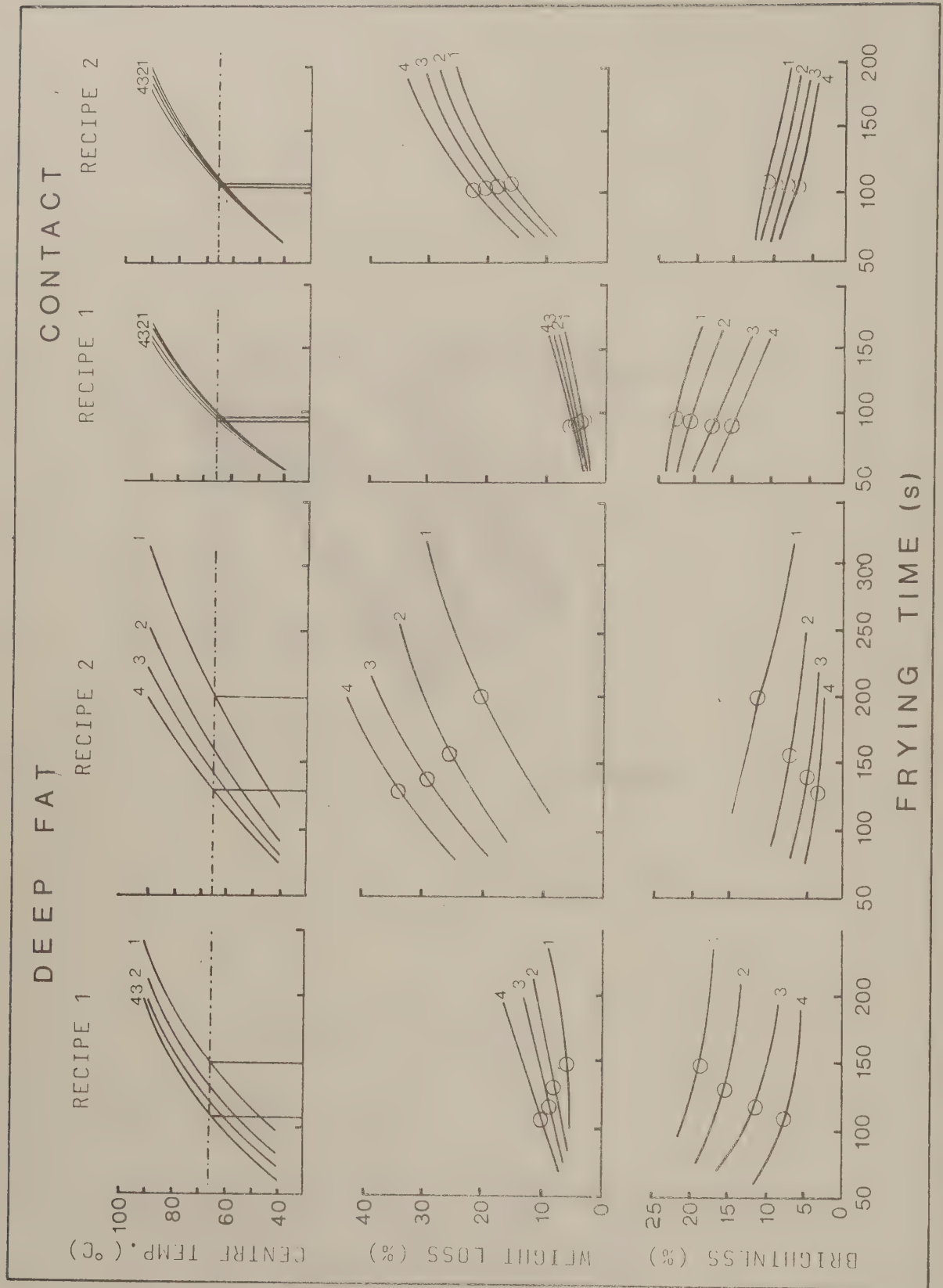


Fig. 5 a. Time functions of centre temperature, weight loss and brightness.

The meaning of 1, 2, 3 and 4 is:

130, 150, 170 and 190°C for deep fat and

150, 170, 190 and 210°C for contact respectively.

The circles in the diagrams correspond to 65°C centre temperature.

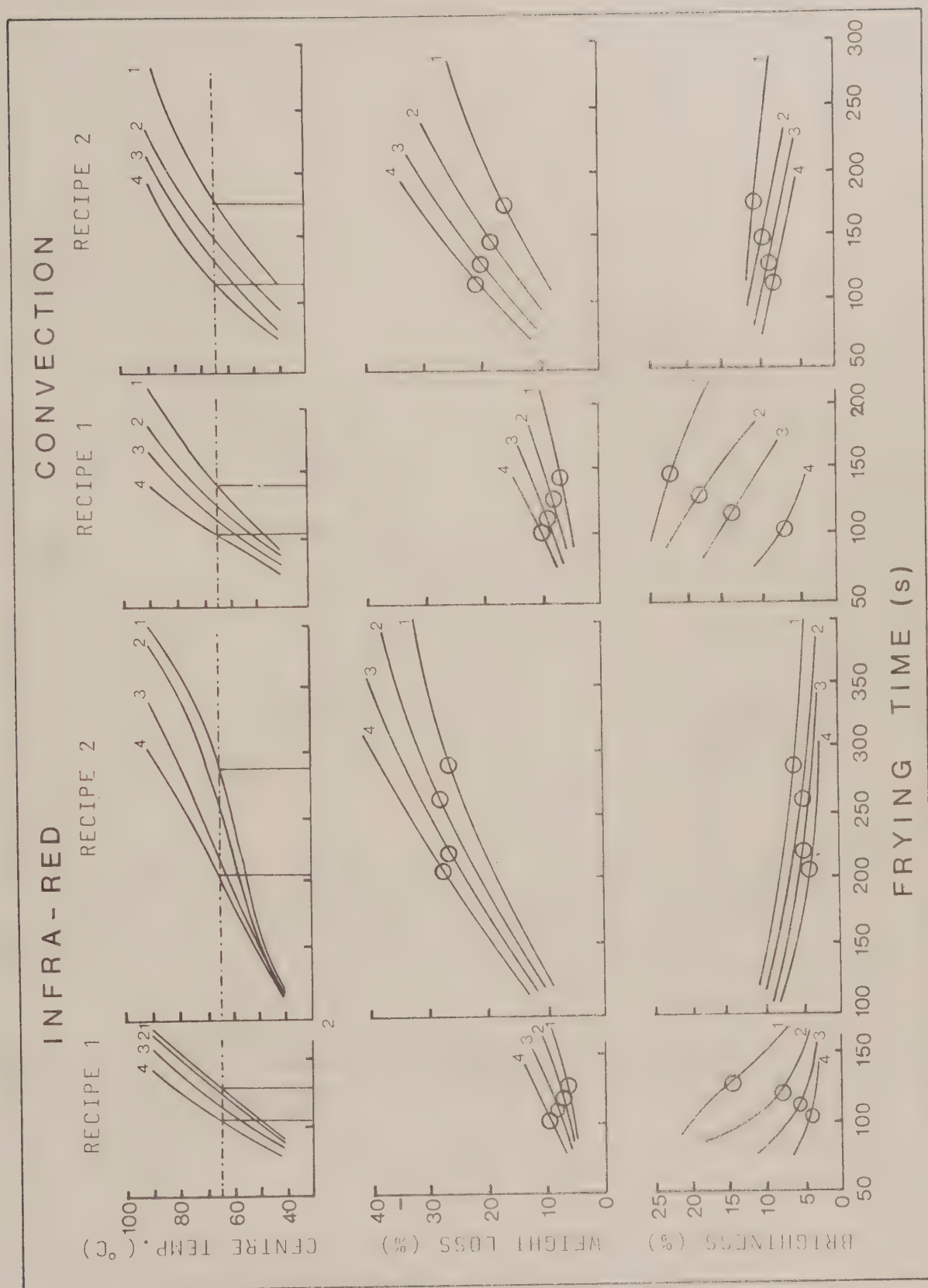


Fig. 5 b. Time functions of center temperature, weight loss and brightness.
 The meaning of 1, 2, 3 and 4 is:
 15, 18, 21 and 25 kW/m^2 for infra-red and
 200, 250, 300 and 350°C for convection frying resp.
 The circles in the diagrams correspond to 65°C
 center temperature.

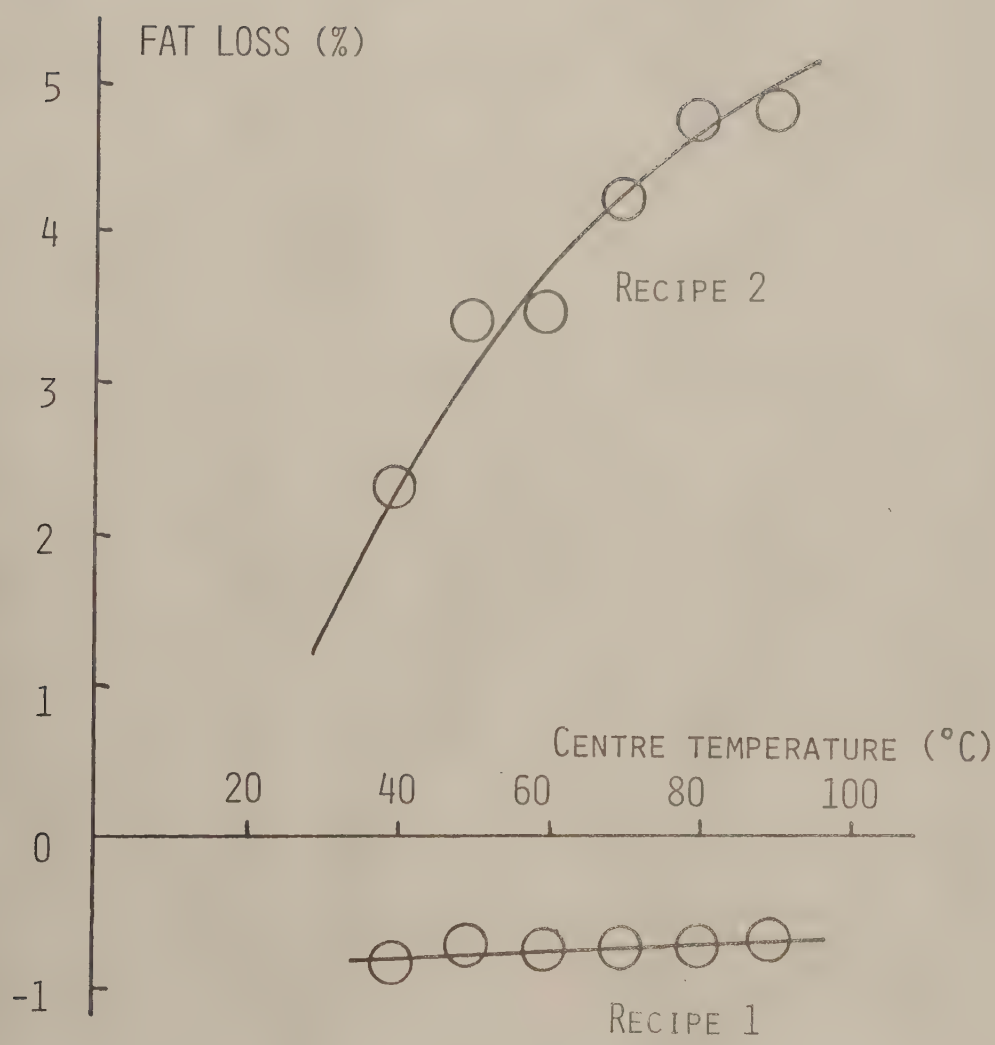


Fig. 6. Fat loss during contact frying - average values of the four frying temperatures.

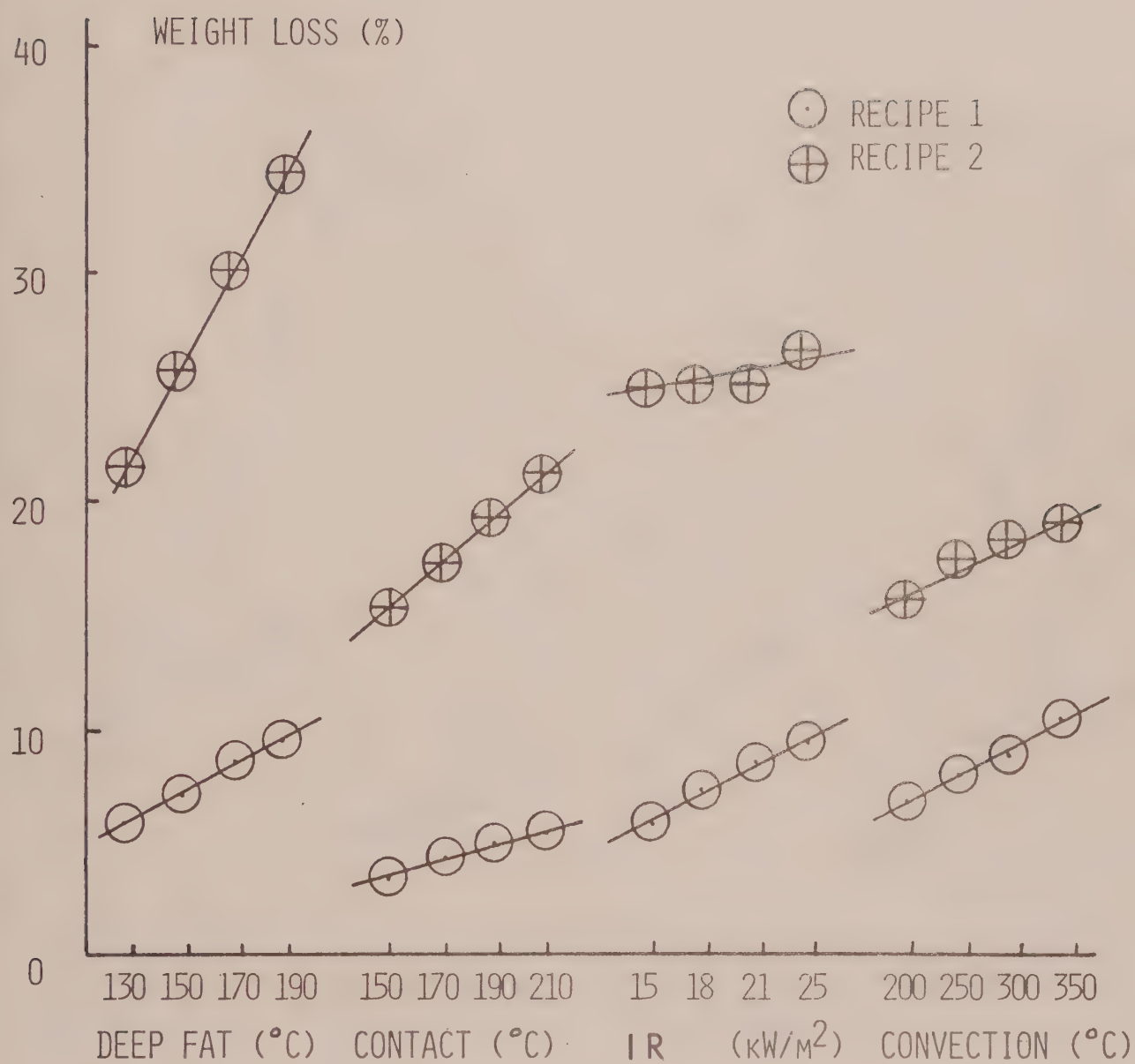


Fig. 7. Frying to 65°C in the centre - weight loss.
(average values of five experiments)

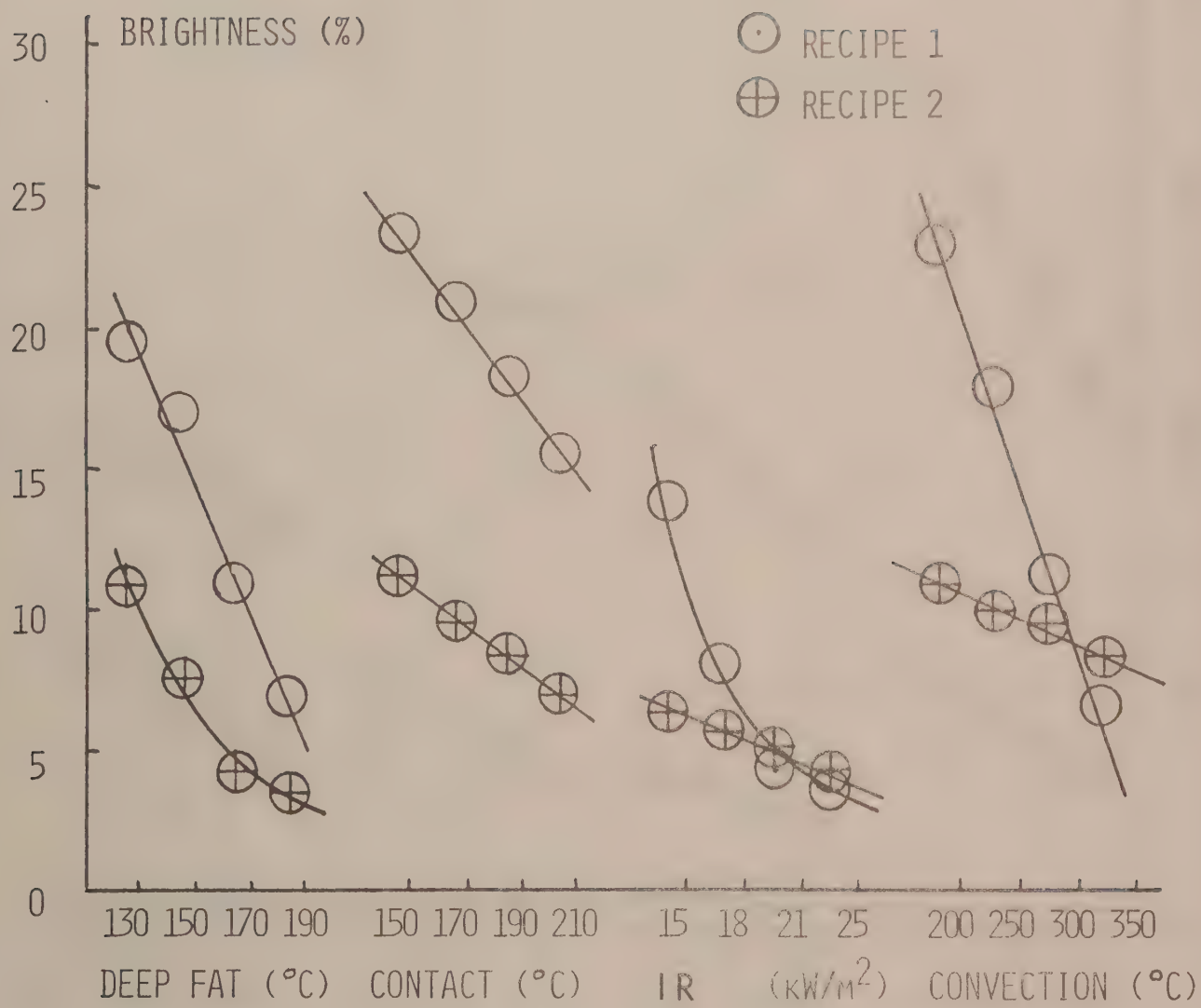


Fig. 8. Frying to 65°C in the centre - brightness.
(average values of five experiments)

A COMPARISON BETWEEN FOUR DIFFERENT METHODS OF FRYING
MEAT PATTIES

Part two - Sensory quality

Magnus Dagerskog
SIK - The Swedish Food Institute
Fack
S-400 23 GÖTEBORG

Per Sörenfors
Department of Food Engineering
Lund Institute of Technology
Box 50
S-230 53 ALNARP

A COMPARISON BETWEEN FOUR DIFFERENT METHODS OF FRYING MEAT PATTIES

2. Sensory quality

by Magnus Dagerskog and Per Sörenfors

SIK - The Swedish Food Institute
Fack, S-400 23 Göteborg, Sweden

ABSTRACT

By experiments on a laboratory scale the four frying methods deep fat, contact, long wave IR and convection frying have been compared for meat patties made from two different recipes. The methods have been optimized individually with respect to flavour, appearance and texture and have finally been compared directly with each other. Optimal values for appearance, flavor and texture often coincided. Different optimal intensity levels were found for the two recipes. With regard to appearance, deep fat frying and contact frying were judged slightly better than the other two methods. From flavor measurements it was only concluded that deep fat frying resulted in slightly higher off-flavor than did the other methods.

INTRODUCTION

For industrial frying of meat products, deep fat, contact, IR (infra-red radiation) and convection heating are the most common methods. For comparison of these methods, well defined experiments on a laboratory scale were carried out. In Part one of this investigation, which is also published in this issue of LWT, the influence of different processing parameters on heat transfer, weight losses and surface crust formation were studied. The objective of this second part is to compare the sensory quality of the fried patties for the same four frying methods and two recipes used in Part one.

Causey et al. (1950) compared pan-broiling, oven-broiling and microwave heating (with and without pre-browning), when cooking 1.6 cm thick frozen raw patties of pork and beef. Pan-broiled, oven-broiled and pre-browned dielectrically cooked patties were judged desirable in all qualities. Patties thawed during cooking were more frequently preferred than those pre-thawed. Pan-broiling ranked the highest in order of preference of the tested cooking methods.

Visser et al. (1960) found that average tenderness scores for roasts deep fat fried at 100°C were slightly lower than for those cooked in the oven at 150°C or in deep fat at 110°C. Roasts cooked in the oven and in deep fat at 100°C were juicier than those deep fat fried at 110°C.

For meat patties Bengtsson and Jakobsson (1974) compared deep fat frying, short wave IR-frying and pan frying. The sensory evaluation after frying showed equal appearance and flavor scores for deep fat frying and pan frying, while IR-frying resulted in lower scores. For juiciness and texture no major difference between methods was found.

EXPERIMENTAL

Experimental plan

The sensory tests were made in two parts. First the optimal intensity level within each frying methods was determined (A), and then the four optimized methods were compared with each other (B).

Raw material and frying equipment

The same raw materials, recipes, preparation of patties and frying equipment were used as in Part one.

For each frying method the following four intensity levels were tested:

<u>Method</u>	<u>Frying variable</u>	<u>Intensity levels</u>
Deep fat	fat temperature	130, 150, 170 and 190 ^o C
Contact	pan temperature	150, 170, 190 and 210 ^o C
Long wave IR	IR-flux	15, 18, 21 and 25 kW/m ²
Convection	air temperature	200, 250, 300 and 350 ^o C

Sample preparation

Since testing could not be carried out immediately after frying, the following procedure was used for practical reasons. After frying, the meat patties were frozen on trays and stored in aluminium foil laminated pouches under nitrogen atmosphere for 2-3 weeks at -40^oC, until the sensory evaluations were carried out. Then the meat patties were thawed in a refrigerator at 5^oC for 16 hours, put in stainless steel petri dishes with close-fitting lids and reheated to 65-70^oC center temperature in a convection oven at 150^oC for 16 minutes. During reheating, the petri dishes were moved around twice to avoid great differences in final centre temperature due to uneven oven heating. Immediately

after reheating, the petri dishes were placed on food warmers (65°C) in the tasting booths.

Measured losses during the freezing and reheating operations were around 4% for both, independent of recipe.

Analysis of sensory quality

A. For the evaluation of the optimal heating intensity level within each frying method the following sensory properties were scored, using 9-point scales with the end points anchored in the words given in parenthesis:

1. Intensity of darkness (1 = very bright; 9 = very dark).
2. Total impression of appearance (1 = very bad; 9 = very good).
3. Total impression of flavor (1 = very bad; 9 = very good).
4. Intensity of firmness (1 = very soft; 9 = very firm).
5. Total impression of texture (1 = very bad; 9 = very good).

In each session the judges received five coded patties at the same time. Four of these were fried by the same method but at different intensity levels, and one was used as a reference. The reference was always newly-fried in a double-sided contact fryer at 190°C and was given fixed scores in training sessions. Different scores were set for the references of the two recipes. Throughout the tests 10 semi-trained judges selected from staff members were used.

B. For the comparison between the four frying methods the judges consisted of 20 members, all of whom were paid non-employees. They were not trained before the tests. As before, 9-point interval scales were used during scoring of the following sensory properties:

1. Intensity of darkness (1 = very bright; 9 = very dark).
2. Total impression of appearance (1 = very bad; 9 = very good).
3. Intensity of off-flavor (0 = none; 8 = very strong).
4. Total impression of flavor (1 = very bad; 9 = very good).
5. Intensity of juiciness (1 = not juicy; 9 = very juicy).
6. Total impression of texture (1 = very bad; 9 = very good).

No reference was used, and the judges therefore received four coded patties, one from each of the four frying methods.

RESULTS

Optimization within methods

The judged sensory quality of the meat patties as a function of the frying intensity level is listed in table 1 for the four frying methods. As expected, the surface crust is rated darker the higher the intensity levels. However, the total impression scores indicate an optimum at intermediate intensity levels. For recipe 1 this optimum is found for the second highest intensity level for all methods, except for IR, where the second lowest level is optimal. Recipe 2 is initially darker and the optimum is found at the lower intensity levels, except for convection frying, where a higher level is needed. From the flavor scores it can be seen that IR (Recipe 1) and deep fat frying (Recipe 2) are strongly influenced by the intensity level. Regarding texture, no strong influence of intensity level was found, except for deep fat frying. The optimum levels often coincide for both texture, flavor and brightness.

Based on these evaluations the optimal intensity for each method was determined. Most attention was then given to appearance and flavor.

Optimal intensity levels

	Deep fat	Contact	IR	Convection
Recipe 1	170°C	190°C	18 kW/cm	300°C
Recipe 2	150°C	170°C	15 kW/cm	350°C

Comparison between methods

By the untrained external panel the four frying methods were compared for products fried at the optimal intensity levels to a final center temperature of 65°C. The results of the sensory tests are shown in figure 1.

The data were further treated by analysis of variance for two-way classification with respect to recipes and methods. With interaction effects present, a one-way classification was also used. The differences obtained were tested by Scheffe's method for significance.

On the basis of the statistical analysis, the following conclusions can be drawn:

<u>Recipe</u>		Significance level (%)
Darkness	Recipe 2 darker than Recipe 1	99
Appearance	--	--
Off-flavor	--	--
Flavor	Recipe 1 better than Recipe 2	95
Juiciness	Recipe 1 juicier than Recipe 2 (excluding convection frying)	99.9
Texture	Recipe 1 better than Recipe 2 (excluding convection frying)	99.9
<u>Method</u>		
Darkness	Deep fat, IR darker than contact, convection	99.9
Appearance	Deep fat better than convection	99
Off-flavor	Deep fat stronger than the other methods	95
Flavor	--	--
Juiciness	Convection juicier than IR (Recipe 2)	99
Texture	--	--

DISCUSSION

In figure 2, obtained from data in Part one of this work, the optimal intensity levels are indicated (with circles). The difference between the optimized methods in regard to darkness and weight loss can be explained if figure 3 is taken into account.

The picture show that the appearance of the surface crust is rather different among the four frying methods. With deep fat frying the surface crust is evenly browned in contrast to the spotted browning in contact frying, resulting from the variation of degree of contact over the surface. For IR- and convection frying the surface crust is similar with burned areas and a skin-like surface, but the periphery of the meat patty is browned first during convection heating in contrast to IR-heating, where the surface area is first browned. Because of this, contact and convection frying were judged brighter than deep fat and IR-frying. For flavor no differences among methods were found, except for deep fat frying, which gave a significantly stronger off-flavor, probably due to the absorbed fat.

The low juiciness scored for the IR-fried patties of recipe 2 is a result of the exceptionally long frying time needed.

The differences between recipes are most significant for weight losses, with 3-4 times greater losses for recipe 2. This also influences the crust color formation because most of the transferred energy is used for evaporation, giving very small differences in crust color between intensity levels. The high meat content of recipe 2 is responsible for the low initial darkness. The high weight losses of recipe 2 are also reflected in the significantly lower juiciness and inferior texture in comparison with recipe 1.

CONCLUSIONS

The work done to optimize and compare the four frying methods show that these methods, from pure heat transfer considerations,

give almost equivalent results if appropriate frying conditions are used (Part one). The formed surface crust of the meat patties is, however, rather different for the four methods, influencing the sensorial experience (Part two).

Finally, it must be kept in mind that the obtained results refer to experiments carried out with laboratory equipment, where only one patty at a time was fried at optimal conditions. As a basis for equipment design and process optimization, these results must be combined with practical experience in industrial fryers.

ACKNOWLEDGMENTS

Thanks are due to Mr Anders Ånäs, Lund's Institute of Technology and Mrs Ulla Gustafsson, who diligently carried out much of the experimental work involved.

REFERENCES

BENGTSSON, N.E. and JAKOBSSON, B., Microwave Energy Applications Newsletter, 6, 3, (1974).

CAUSEY, K., ANDREASSEN, E.G., HAUSGRAH, H.E., ALONG, C., RAMSTAD, P.E. and FENTON, F., Food Research, 15, 237, (1950).

VISSER, R.Y., HARRISON, D.L., GOERTZ, G.E., BUNYAN, M., McNELIS SKELTON, M. and MACKINTOSH, D.L., Food Tech., 193, (1960).

Table 1. Judged sensory quality of meat patties, fried to 65°C center temperature -mean scores by ten trained judges. Standard error for darkness 0.2, for the other properties 0.4.

Frying Method		Deep Fat					Contact					Infra-red					Convection					Reference
Intensity level (°C; kW/m ²)		130	150	170	190	150	170	190	210	15	18	21	25	200	250	300	350					
Recipe 1	Darkness	bright-dark	1.6	2.5	5.4	6.6	1.2	2.3	4.9	5.6	3.4	5.2	7.3	8.4	1.3	2.4	4.0	6.1	3			
	Appearance	bad - good	1.9	3.2	5.1	4.0	1.8	3.2	5.1	4.8	4.0	4.0	1.8	1.2	1.6	2.4	4.2	3.6	4			
	Flavor	bad - good	4.1	4.4	5.2	4.1	4.2	4.1	5.0	4.4	4.9	4.7	3.3	1.8	4.0	4.3	3.8	3.6	5			
	Texture	soft - firm	4.8	4.8	5.5	5.5	4.9	4.9	5.8	6.2	5.7	5.7	5.9	6.2	6.3	6.1	5.4	6.0	5			
	Texture	bad - good	3.4	3.7	4.4	4.2	3.6	3.9	4.4	4.2	3.9	3.9	3.4	3.1	3.2	3.3	4.0	3.4	4			
Recipe 2	Darkness	bright-dark	4.9	6.0	7.6	8.9	4.5	5.3	6.9	7.9	6.7	6.7	7.4	8.2	2.8	2.8	3.1	4.2	5			
	Appearance	bad - good	5.9	5.9	3.4	1.5	4.9	6.5	5.6	4.1	4.9	4.5	3.8	3.0	4.3	4.3	4.8	5.3	7			
	Flavor	bad - good	5.7	6.1	4.8	2.9	5.9	5.6	6.2	4.9	5.7	5.3	5.1	4.2	5.5	5.2	5.4	5.6	7			
	Texture	soft - firm	5.5	5.8	7.0	7.5	5.9	5.9	6.5	6.5	6.3	6.4	6.3	6.5	5.2	5.2	5.5	5.4	5			
	Texture	bad - good	5.0	5.1	4.2	2.7	5.0	5.2	5.0	4.2	4.6	4.5	4.3	4.2	4.3	4.4	4.3	4.7	6			

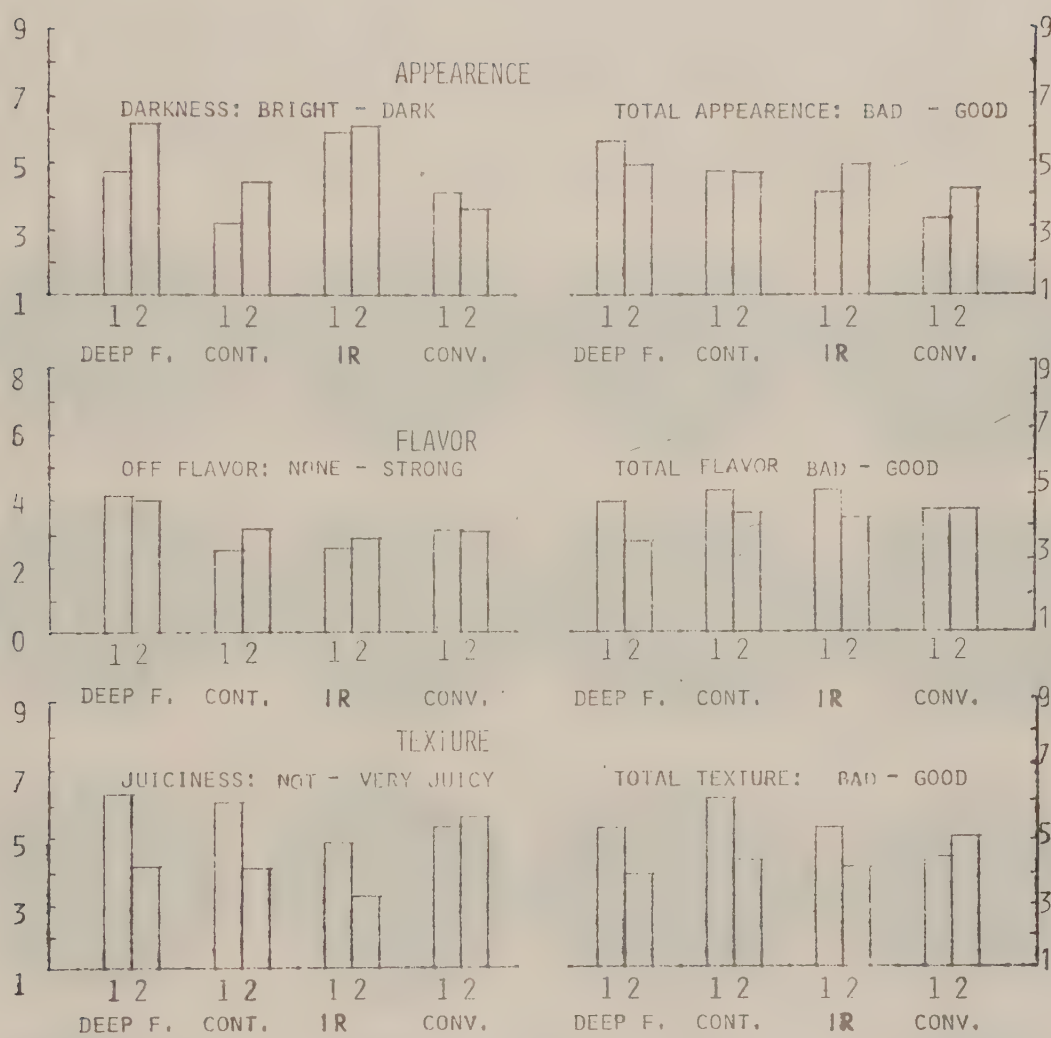
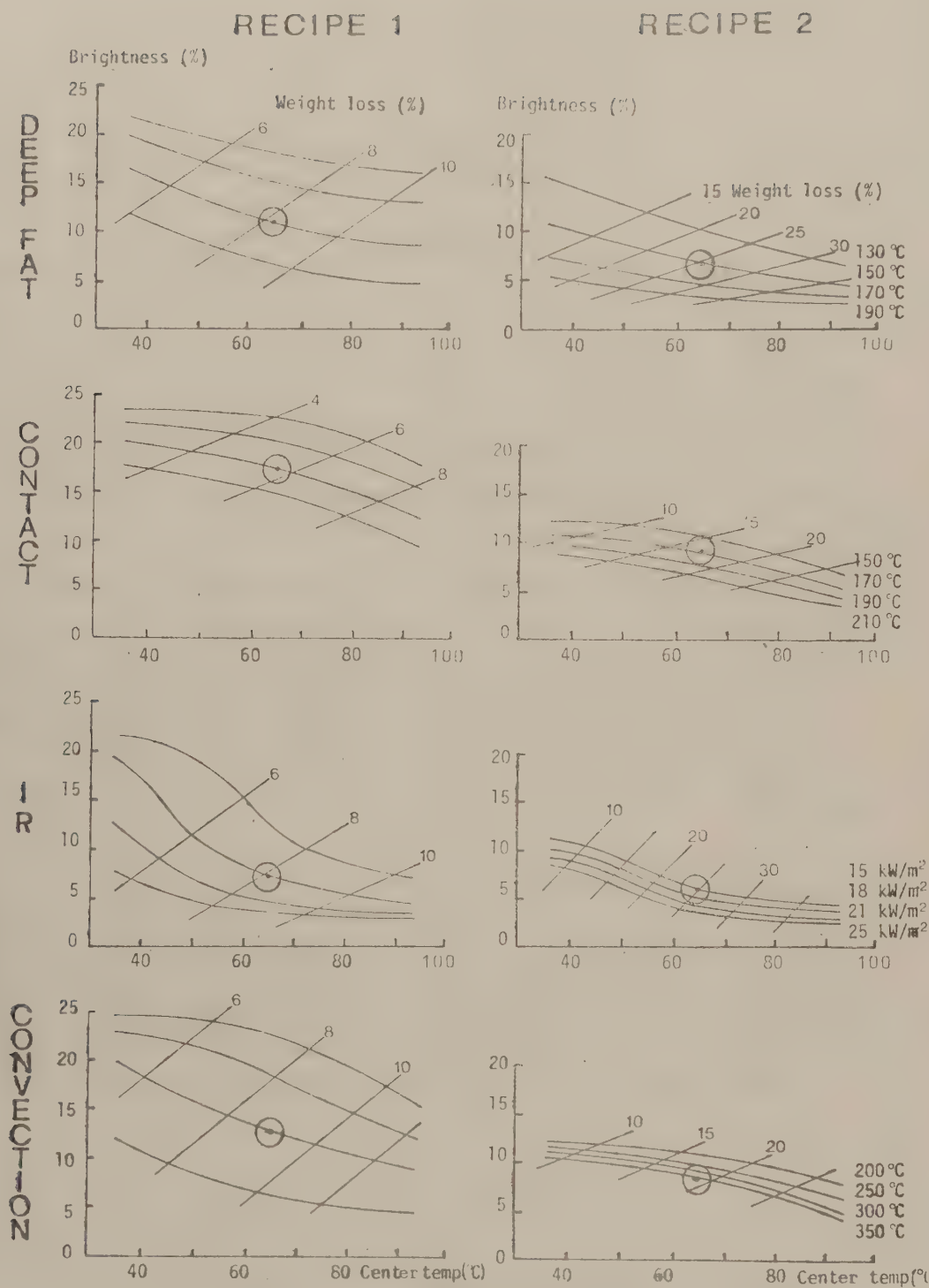


Figure 1. Judged sensory quality of meat patties, fried to 65°C center temperature at optimal frying intensity - mean scores by twenty untrained judges.

Standard error for darkness was 0.3, for the other properties 0.4 (1 and 2 means recipe 1 and 2).



20

15

10

5

0

40

60

80

100

10

15

20

150 °C

170 °C

190 °C

210 °C

65

10

IR

25

20

15

10

5

0

40

60

80

100

6

8

10

65

7

20

15

10

5

0

40

60

80

100

10

20

30

15 kW/m²

18 kW/m²

21 kW/m²

25 kW/m²

65

6

CONVECTION

25

20

15

10

5

0

40

60

80

Center temp(°C)

6

8

10

65

13

20

15

10

5

0

40

60

80

Center temp(°C)

10

15

20

200 °C

250 °C

300 °C

350 °C

65

8

Figure 2. Optimal sensory quality (circle) in relation to brightness, weight loss, frying intensity level and centre temperature.

Figure 3. Appearance of meat patties (Recipe 1)
fried at the four intensity levels
within each frying method.



A = Deep fat (130, 150, 170 and 190°C)

B = Conduct (150, 170, 190 and 210°C)

C = Hot air (150, 170, 190 and 210°C)

D = Convection (200, 250, 300 and 350°C)

MATEMATISKA MODELLER
FÖR STEKNING
AV FÄRSPRODUKTER

Alnarp 1978-10-12
Per Sörenfors
Avd. för Livsmedelsteknik
Tekniska Högskolan i Lund

Innehållsförteckning.

	sid
Sammanfattning	2
1. Inledning	3
2. Stekmetoder	4
3. Matematiska modeller	6
4. Stekapparat	6
4.1. Laboratoriefritös	6
4.2. Kontaktstekare	8
5. Temperaturförlopp	10
6. Frontvandringsmodell	12
7. Mekanismer för värmetransporten	15
8. Experimentella undersökningar	17
8.1. Masstransport i produkten	17
8.1.1. Vatten- och fetthaltsförändringar i centrum	17
8.1.2. Färgämnen som medel att registrera vattenförflyttning	18
8.1.3. Myrsyra som medel att registrera för- flyttning av vattenånga	19
8.1.3.1. Inblandning av indikator i köttfärsen	20
8.1.3.2. Sprayning av indikator på en snittyta genom köttbullens centrum	20
8.1.3.3. Kvantitativ mätning av myrsyrakoncen- trationen	21
8.1.3.4. Mätning av myrsyrakoncentrationen i ytskiktet	23
8.1.3.5. Sammanfattning av myrsyraförsöken	25
8.2. Porositet och svällning	26
8.2.1. Täthet som funktion av tid och temperatur	26
8.2.2. Mätning av porfördelning genom fotogra- fering av tunna snitt	27
8.2.3. Slutsatser angående porositet	30
8.3. Vattentransport från produkten	34
8.3.1. Mätning av drip	34
8.3.2. Mätning av ånga	35
8.4. Vattenhalt i stekskorpan	38

8.5.	Färgmätning	40
8.5.1.	Experimentella resultat	40
8.5.2.	Färgförändringsparametrar	43
8.5.3.	Ljushet vid fritering av köttbullar	46
8.5.4.	Ljushet vid fritering av pannbiffar	47
8.6.	Mätning av värmeöverföringstal vid fritering	47
8.6.1.	Modellbulle	48
8.6.2.	Beräkning av värmeöverföringstal	49
9.	Teoretiska aspekter på värmetransporten	51
9.1.	Värmestrålning i köttfärsen	51
9.2.	Ångtransport i långa porer	52
9.3.	Ekvivalent värmeledningsförmåga	52
9.4.	Konvektion i porer	62
9.5.	Restvattenhalt i stekskorpan	63
9.6.	Kokpunktsförhöjning	65
9.7.	Värmeöverföringstalets inverkan	67
10.	Simuleringar av viktsförlust, yttemperatur m m	69
11.	Simulering av biffstekning	72
12.	Praktisk applikationer	74
13.	Referenser	75
14.	Beteckningar	78
15.	Bilagor	81

Sammanfattning.

Matematiska modeller har ännu ingen framskjutande plats i stekindustrin. Arbetet i denna rapport avser att fylla en del av tomrummet.

Experimentellt stekunderlag har tagits fram. Det är två typer av undersökningar. Dels mätningar av stekvariabler såsom centrumtemperatur, vattenförlust, ytfärg etc. Dels experiment med vars hjälp olika teorier bekräftas eller vederlägges, t ex märkning av vatten för att konstatera eventuell intern ångtransport.

Olika matematiska modeller diskuteras, varvid vissa mekanismer för värmetransporten förkastas respektive utvecklas. Med hjälp av datorsimuleringar jämföres experimentella stekresultat med de matematiska modellerna.

Det huvudsakliga resultatet är en modell med vars hjälp stekning av pannbiffar och köttbullar kan simuleras med avseende på bl a centrumtemperatur och viktsförlust. Stekmetoderna kan utgöras av i första hand fritering och kontaktstekning (teflonband).

Modellen avses komma till användning vid projektering och drift av industriella steklinjer.

Matematiska modeller för stekning av färsprodukter.

1. Inledning.

Det finns idag inom livsmedelsindustrin ett behov av process-tekniskt underlag för stekning. Anledningen till detta är framför allt att man i allt större utsträckning övergår till andra stekmetoder än den förr praktiskt taget allena rådande friteringen. De nya stekmetoderna, kontaktstekning, IR-stekning, konvektionsstekning etc är relativt oprövade och man har ännu ej nått fram till optimala stekparametrar. Särskilt besvärligt har man vid projektering av nya steklinjer där flera värmebehandlingssteg skall ingå. Processtekniskt underlag är givetvis också viktigt när det gäller att hålla den befintliga stekanläggningen under kontroll, speciellt mot bakgrund av att varje utbytesprocent eller driftsstörning betyder mycket pengar, eftersom det är fråga om en kombination av dyr produkt och stor produktion per tidsenhet.

Processtekniskt underlag får man fram genom teoretiska studier och experimentella undersökningar. Det är detta, denna rapport i huvudsak skall handla om. Sådant underlag kan sammanfattas i en matematisk modell, som alltså med matematiskt språk talar om vad som inträffar när en produkt utsättes för olika påverkan.

Under de teoretiska studierna har ambitionen bl a varit att försöka täcka in alla tänkbara mekanismer för värmetransport. Det finns nämligen särskilt vid stekning förutsättningar för många okonventionella mekanismer för värme- och mass-transport.

Teoretiska studier har även utförts på en del av de mättekniska metoder, som använts i de experimentella undersökningarna. Mättekniken, särskilt temperaturmätning och mätning av fysikaliska egenskaper, kan vara besvärlig i livsmedels-sammanhang. Reproducerbarheten är i allmänhet dålig, men man har också ofta problem med systematiska fel, som kan vara svåra att kontrollera. Det förra beror framför allt på att livsmedlet är inhomogent och varierar, dels från dag till dag, dels under mätning. Det senare kan bero på att livsmedlet

ofta uppför sig olika beroende på om det befinner sig i en process eller i en mätcell.

Flera matematiska modeller kommer att uppställas. Ingen av dem kan exakt efterlikna praktiken, därför att det finns för många variabler att ta hänsyn till. En god modell skall innehålla bara de väsentligaste variablerna. För att få en så praktiskt användbar modell som möjligt kan man använda empiriska korrektioner. Det är dock viktigt att man i botten har en teoretiskt underbyggd modell. Först då kan alla viktiga parametrar simuleras på ett acceptabelt sätt.

Ett datorprogram /1/ har konstruerats för att de modeller, som avhandlas i denna rapport, skall kunna simuleras. De diagram över simuleringar, som kommer att visas i fortsättningen är framtagna med just detta program.

2. Stekmetoder.

Med stekning menar vi värmetillförsel till ett livsmedel så att följande två mål uppnås: En stekyta skall bildas och en viss centrumtemperatur skall uppnås. Egentligen bör det senare målet definieras så att ett visst minimi-tid-temperaturförlopp skall ske i varje punkt av produkten för att koagulering och en viss bakteriologisk effekt skall uppnås. Men i alla praktiska fall kan detta falla in under ovanstående definition.

Här kommer bara färsprodukter att behandlas. Färsprodukter har i allmänhet goda vattenbindande egenskaper, därför att de i regel innehåller äggpulver, skorpmjöl, mjölkpulver etc. En viss vattenförlust är dock ofrånkomlig om man vill att en naturlig stekyta skall bildas. Vid industriell stekning av färsprodukter, som ju är en viktig del av det som produceras av livsmedelsindustrin, strävar man efter att inom ramen för de ställda villkoren för stekyta och centrumtemperatur, uppnå så god ekonomi som möjligt. Detta innebär bl a: kort stektid, låg viktsförlust hos produkten, hög energiverkningsgrad hos stekaren, låga investeringskostnader, lite arbetskrävande o s v.

Faktorer som indirekt bidrar till god ekonomi är naturligtvis produktens smaklighet, saftighet, näringsvärde etc. De stekmetoder som står till buds ger rätt olika kostnadsbild och ofta ganska skilda stekresultat /2/. (En kombination av två olika stekmetoder är därför intressant.)

Ytstekmetoder har alla det gemensamt att värme tillföres produktens yta på ett eller annat sätt och att denna värme skall förmå att höja temperaturen inuti produkten via värmeledning samt att bilda stekyta. Om denna definition kan accepteras så faller mikrovågsvärmning, högfrekvensvärmning och elektrisk motståndsvärmning utanför begreppet ytstekning. I fortsättning diskuteras endast metoderna: kontaktstekning (hällstekning, bandstekning), fritering, IR-stekning (värmestrålning) och hetluftstekning (ugnar, konvektionsugnar). Hetluftstekningen kommer dessutom att benämnas konvektionsstekning, eftersom vanliga ugnar utan anordningar för påtvingad luftcirkulation, ekonomiskt är ointressanta för stekning av färsprodukter (det gäller även stekning av köttfärslimpor).

Den valda definitionen på ytstekning bör innebära att stekmetoden bara påverkar sättet att överföra värme till ytan, och att centrumtemperaturens uppförande följaktligen är oberoende av stekmetod, och bara beroende på produktens egen värmeledningsförmåga. Och då ytan nästan genast lägger sig på konstant 100°C , borde centrumtemperaturförloppet vara nästan oberoende av både stekmetod och inställd värmeeffekt. Emellertid är det inte så enkelt: Vid IR-stekning t ex har man en viss inträngning av strålning eftersom färsen är delvis transparent för vissa våglängder och vid dubbelsidig kontaktstekning hindras produkten att svälla, vilket kan påverka värmeledningen på flera sätt. Dessutom är det rent praktiskt så att omgivningstemperaturen vid fritering eller konvektionsstekning i hög grad påverkar centrumtemperaturen. Det beror bl a på att produkten skenbart krymper allteftersom stekskorpa bildas. D v s den drivande kraften, koktemperaturen närmar sig centrum.

3. Matematiska modeller.

Det är viktigt att en modell på ett riktigt sätt efterliknar i första hand centrumtemperatures, vattenförlustens och ytfärgens tidsförlopp vid olika stekmetoder och stekartertemperaturer. Vid framtagning av en sådan modell är det lämpligt att hålla sig till en produktgeometri och en stekmetod för att hålla antalet parametrar lågt. När modellen är tillräckligt noggrann för det specialfallet bör den kunna användas för alla övriga produktgeometrier och stekmetoder. Därför är det viktigt att modellen grundar sig på verkliga värme- och masstransportförhållanden. Annars måste mer eller mindre naturliga parametrar införas då modellen generaliseras till övriga fall.

Här skall köttbullsfritering ligga till grund för modellen av följande skäl: Fritering av köttbullar är den vanligaste kombinationen av produktgeometri och stekmetod. Den sfäriska formen på produkten gör det matematiskt och experimentellt lättare att handskas med modellen. Fritering är en metod som är relativt lätt att arrangera. God reproducerbarhet kan också nås genom att alla processvariabler är lätta att hålla konstanta, t ex fettets temperatur och kvalitet, strömningshastighet, stektiden etc.

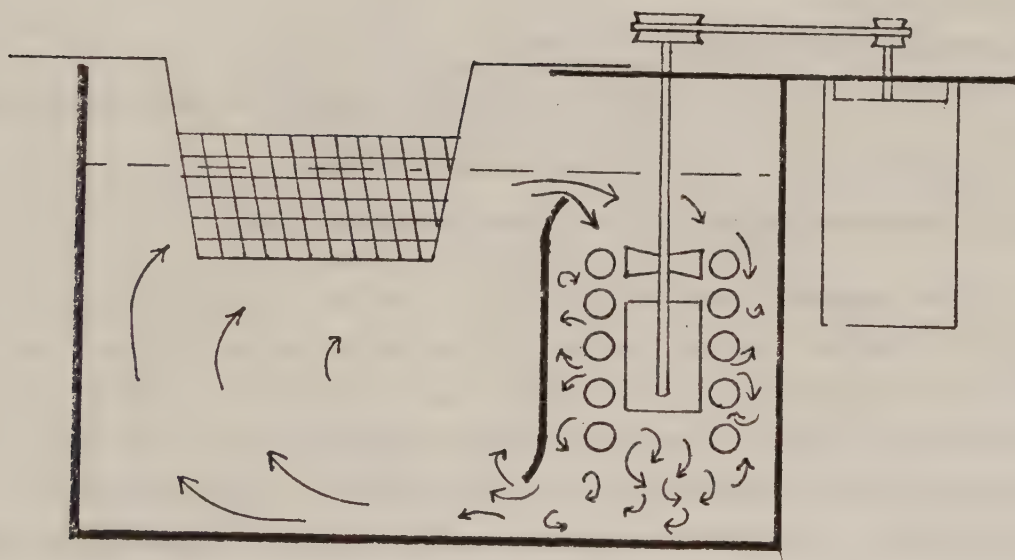
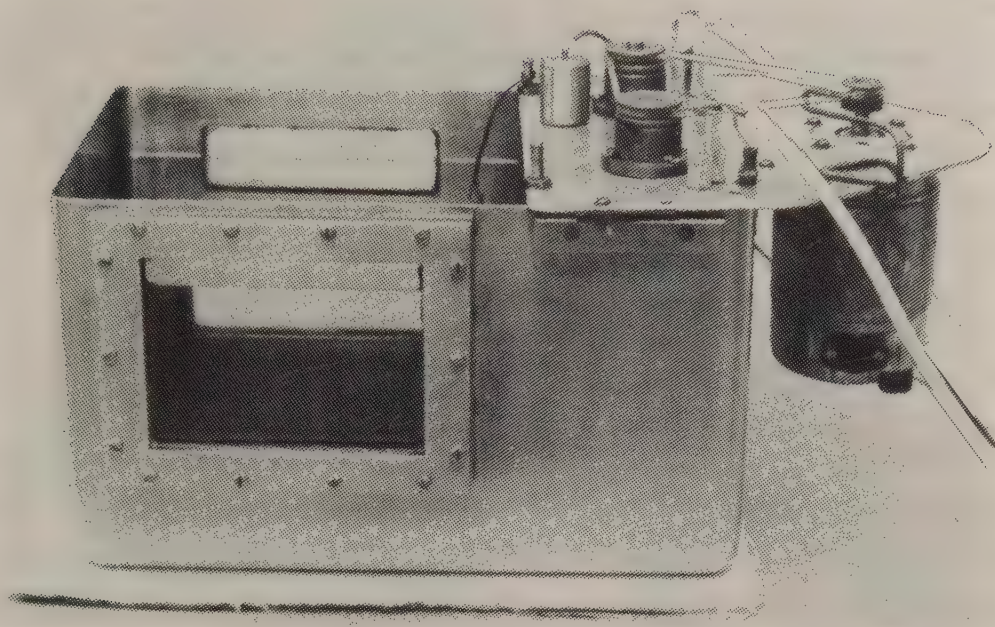
4. Stekapparat.

4.1. Laboriefritös.

En mindre fritös av bordsmodell har tillverkats. Den har utformats så att konstanta inställningar av temperatur och fettflöde kan bibehållas, samtidigt som risken för överhettning av oljan invid elementen är minimal. Utseendet framgår av de två figurerna på nästa sida.

Kärlet, som är försett med två fönster av pyrexglas, delas av en vägg i två delar, friteringsdel och reglerdel. Väggen är öppen upptill och nedtill så att fettets kan strömma mellan reglerdelen och friterdelen.

Laboratoriefritös.



Figur 1.

I reglerdelen finns två värmeslingor, en regler slinga och en kompen sationsslinga. Regler slingan matas med konstant reglerbar spänning, som slår till och från. Kompen sationsslingan matas med konstant reglerbar spänning för att kompen sara värmeförlusterna. I varje slinga är en omrörare placerad, som drivs av en gemensam motor. Omrörarna är konstruerade så att de ger stor turbulens i reglerdelen och en relativt långsam ström i friterdelen.

En platinamotståndstermometer, som är placerad intill regler slingan, styr en temperaturregulator av "on-off"-typ.

Arrangemanget med två värmeslingor gör att mycket stor temperaturnoggrannhet kan uppnås, genom att ställa in effekterna så att on- och off-tiderna blir lika långa. Optimala inställning på regler slingan visade sig vara 100 W, ty då är temperaturnoggrannheten $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$, samtidigt som en temperaturstörning utsläckes relativt snabbt.

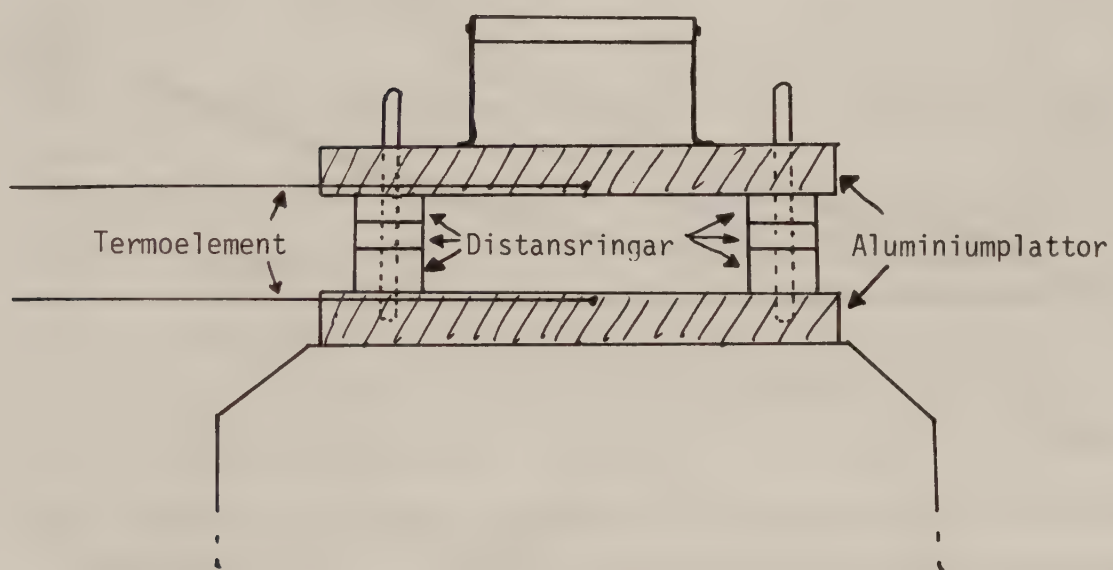
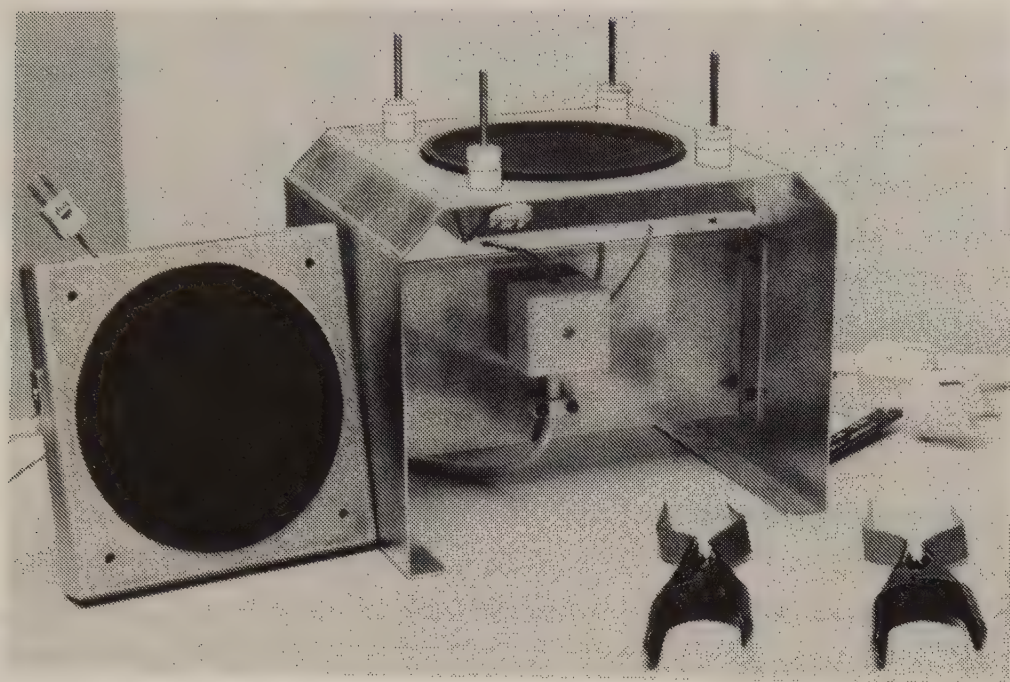
Data och prestanda:

Värmeslingor:	2 st 400 W/200 V
Temperaturnoggrannhet:	normalt $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$
Dimensioner:	höjd 20 cm, bredd 20 cm, längd 30 cm
Volym:	10 liter.

4.2. Kontaktstekare. /2, 7/

En liten apparat har tillverkats, efter utvecklingsarbete på SIK, för att kunna steka platta köttfärsprodukter på båda sidor samtidigt. Den fungerar på följande sätt: Två cirkelrunda, teflonbelagda aluminiumplattor är lodrät fixerade mot varandra med tre variabla distansringar emellan sig. Den undre plattan sitter fast i fotställningen, medan den övre är försedd med ett handtag. Plattorna innehåller en värmespiral var på 1000 W. Effekten i vardera plattan regleras med en "on-off"-regulator, som får mät signalen från ett termoelement, som är inbörat i plattans centrum. Det är möjligt att steka pannbiffar och liknande, en i taget, upp till 10 cm i diameter och ca 4 cm:s tjocklek.

Dubbelhäll.

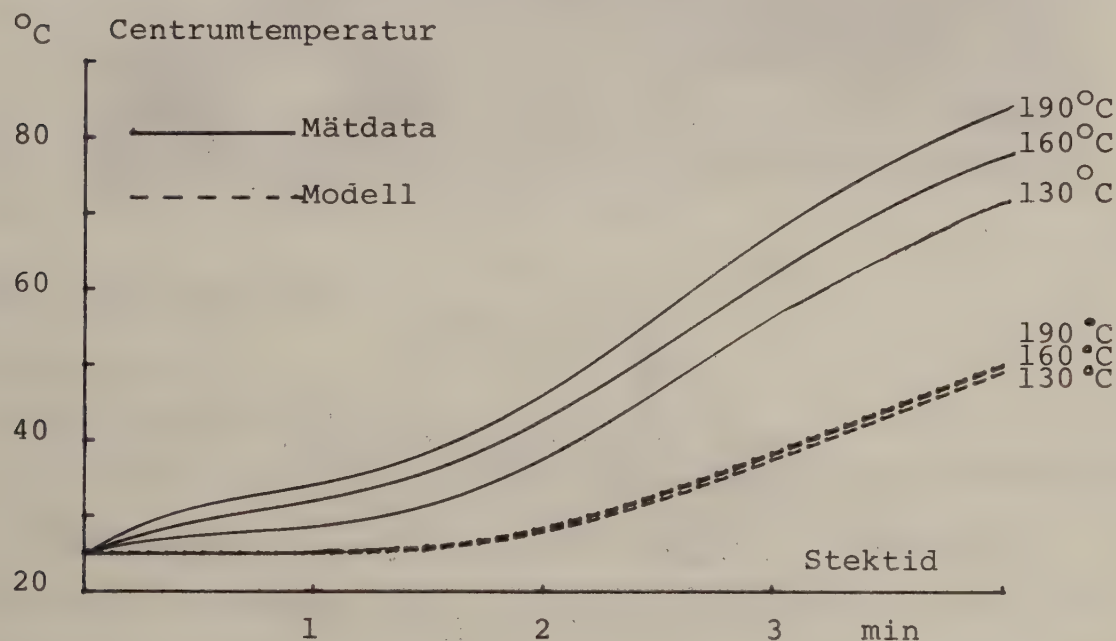


Figur 2.

5. Temperaturförlopp.

Vi skall först se på typiska temperaturförlopp vid fritering av köttbullar. Här och i fortsättningen (om inget annat sägs) är köttbullens vikt 17.5 gram vilket innebär att diametern är 32 mm. Receptet är (också i fortsättningen) ett industriellt sådant med goda vattenhållande egenskaper. Fetthalt 14% och vattenhalt 66%. Temperaturen har uppmätts med ett termoelement av standardtyp (koppar-konstantan, 0.25 mm).

I figur 3 har de tre fettemperaturerna 130, 160 och 190°C använts.



Figur 3.

De streckade kurvorna är beräknade temperaturförlopp enligt en enkel modell, som inte tar hänsyn till att stekskorpa bildas, men som antar att ytan p g a ett värmeöverförings-tal inte omedelbart når 100°C. Sedan 100°C nåtts, hålles ytan konstant vid 100°C. Värmeöverföringstalet antogs vara 300 W/m² °C för att tiden till ytkokning skulle stämma med experiment. Värmeledningstalet antogs vara 0.4 W/m °C /3/. Tätheten sattes till 1000 kg/m³ och värmekapaciteten 3400 J/kg °C.

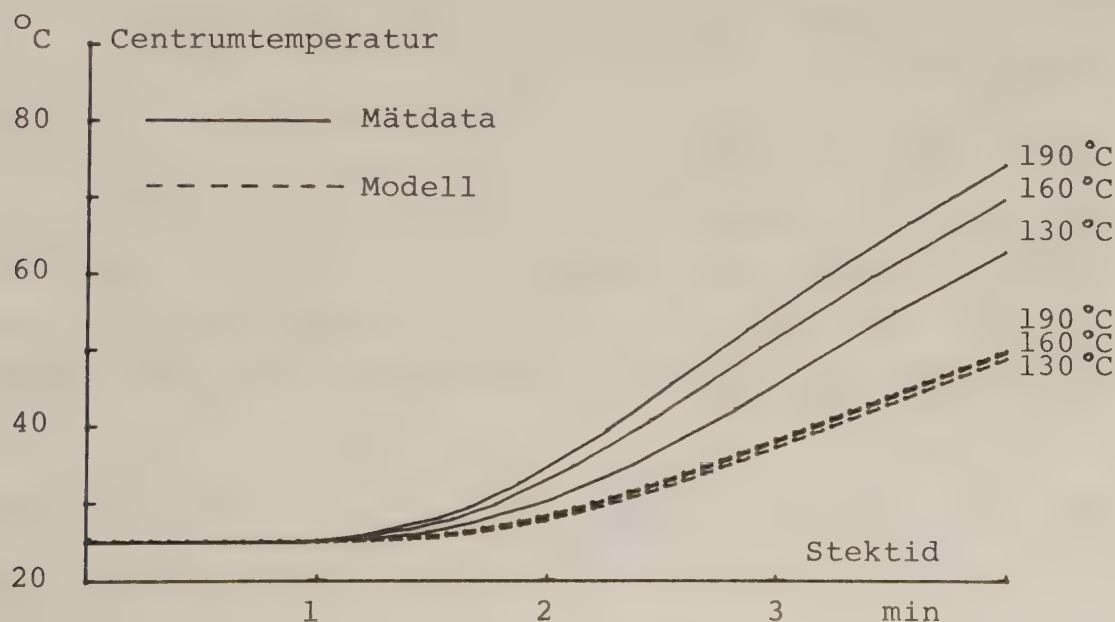
Till att börja med kan man konstatera att temperaturmätningssmetoden är otillräcklig ty centrumtemperaturen kan omöjligen börja stiga redan från början, utan en viss död-tid måste finnas. En genomgång av temperaturmättekniken gjordes därför enligt rapport /4/. De viktigaste resultaten var att mätning av centrumtemperatur bör ske med termoelement av chromel-alumel, eftersom det har mycket sämre värmeledningsförmåga än koppar-konstantan. Dessutom bör termoelementet vara av tunn tråd och omges av en luftkyld hylsa så att det inte kommer i kontakt med friteringsfettet.

Sedan temperaturmättekniken sålunda förbättrats har en försöksserie utförts där 45 köttbullar mättes, uppdelade på de tre fettbadstemperaturerna 130, 160 och 190°C. Begynnelse-temperaturen, 25°C varierade $\pm 2^\circ\text{C}$, men kurvorna korri-gerades mot 25°C med följande formel:

$$t_{\text{kor}} = 100 - 75 \cdot \frac{100 - t}{100 - t_b} \quad (1)$$

där t_b är begynnelsetemperaturen och t är den mätta temperaturen.

Eftersom mätfelet alltid måste vara positivt uttogs de fem lägsta kurvorna vid varje badtemperatur. Standardavvikelsen var då bara 1.0°C vid 3 minuters stekning. Medelvärdeskurvor uppritades (se figur 4), vilka i fortsättningen kommer att refereras som en mall för korrekta mätningar.



Figur 3 har alltså övergått i figur 4 sedan mätfelen eliminerats. Vi kan då åter begrunda jämförelsen mellan modell och experiment och finna stora skillnader. Dels skulle modellen behöva ett bättre värmeledningstal och dels måste modellen modifieras så att större påverkan på centrumtemperaturen erhålles då fettbadstemperaturen ändras. En bättre modell tar hänsyn till att stekskorpa bildas, varvid en 100°C -isoterm långsamt vandrar in mot centrum. På så sätt ökar drivkraften för värmetransport (temperaturgradienten). Den blir också mer beroende av fettbadstemperaturen, eftersom stekskorpans tjocklek starkt beror av fettbadstemperaturen.

6. Frontvandringsmodell.

Värmeledningsekvationen /5/ i sfäriska koordinater lyder:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} \cdot \varrho \cdot c_p = \frac{1}{x^2} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot x^2 \cdot \frac{\partial t}{\partial x} \right)$$

Högra ledet deriveras under antagande att värmeledningstalet varierar med temperaturen.

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} \cdot \varrho \cdot c_p = \lambda \cdot \left[\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{2}{x} \cdot \frac{\partial t}{\partial x} + \frac{d \ln \lambda}{dt} \cdot \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (2)$$

Den sista termen är i allmänhet försumbar.

Fysikaliska data (ϱ , c_p och λ) antas vara funktioner av temperaturen.

Randvillkor i centrum:

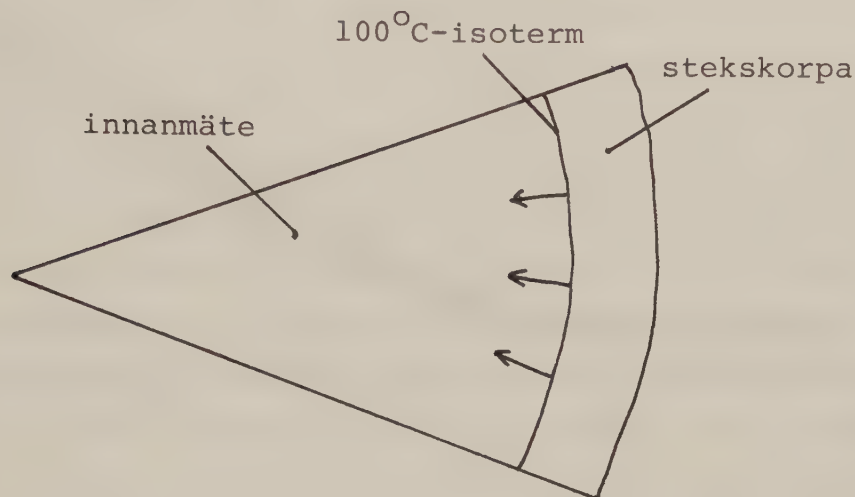
$$\left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)_0 = 0 \quad (3)$$

Randvillkor vid ytan:

$$\alpha \cdot (t_{\infty} - t_R) = \lambda \cdot \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)_R \quad (4)$$

Sedan ytan uppnått 100°C börjar definitionsmässigt stekskorpa bildas.

Köttbullen delas av 100°C -isotermen, enligt figur 5, i två zoner:

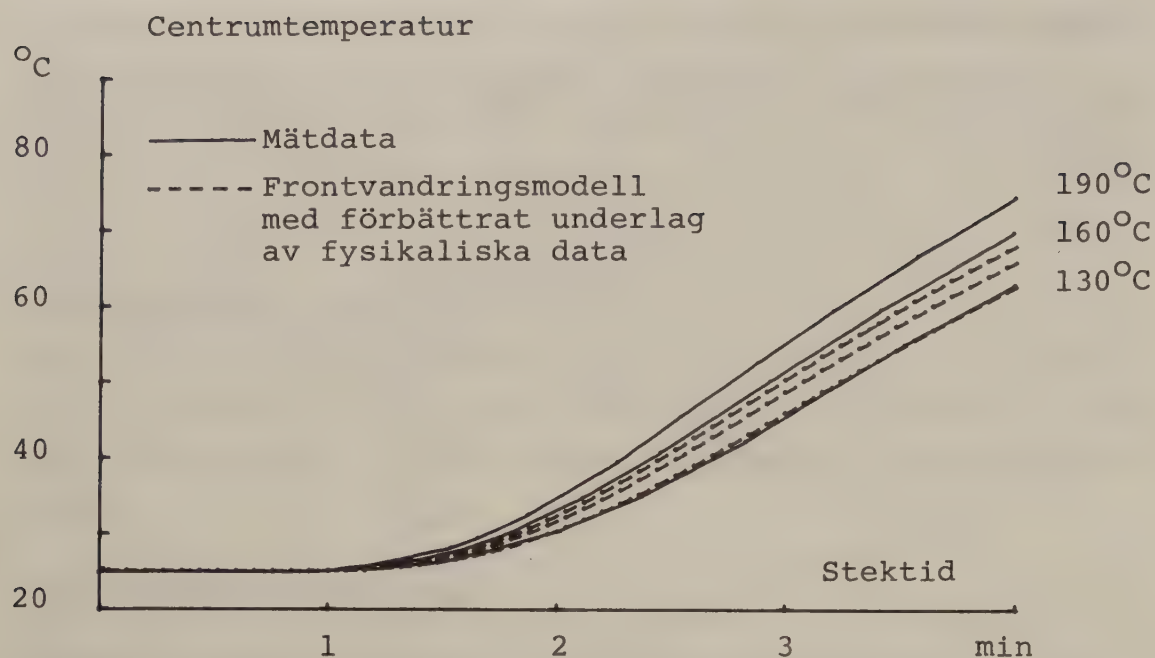


Figur 5.

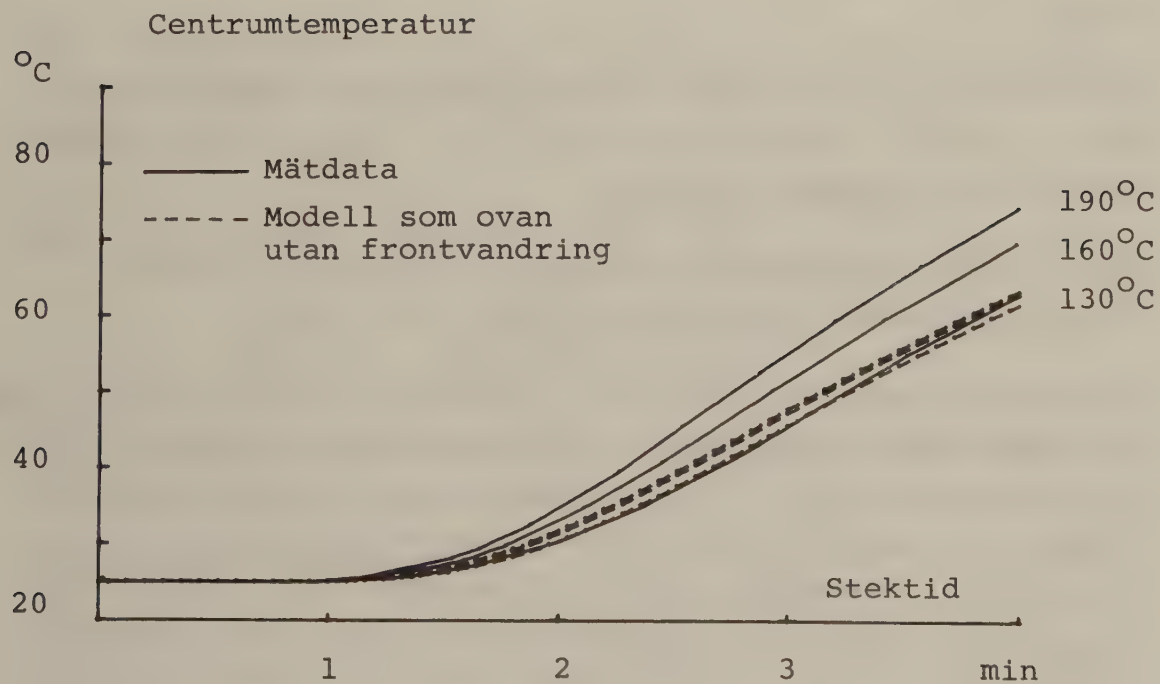
Zonerna har olika värden på de fysikaliska storheterna g , c_p och λ . Tillväxten av den yttre zonen (stekskorpan) bestäms av följande villkor:

Genom ytan intransporterat värme - Ackumulerat värme =
Avkokat vatten $\times$ Ångbildningsvärmets för vatten

Problemet löses numeriskt och simuleras med det datorprogram som beskrivs i rapporten "Datorprogram för stekning av köttfärsprodukter" /1/. Vid simuleringen användes fysikaliska data som framtagits med delvis egna mätmetoder /6/. Vid 50°C är värmeledningstalet $0.49 \text{ W/m }^{\circ}\text{C}$. I figur 6 har de nya simuleringarna uppritats tillsammans med experimentella data. I figur 7 har frontvandringsfenomenet satts ur spel. En jämförelse mellan figur 6 och 7 visar därför hur mycket frontvandringsmekanismen betyder för värmetransporten.



Figur 6.



Figur 7.

7. Mekanismer för värmetransporten.

Det är tydligt att frontvandningsmodellen själv inte försmår förklara centrumtemperaturkurvorna. Man anar att masstransporten (vatten) på något sätt påverkar centrumtemperaturen, eftersom oljebadets temperatur i första hand påverkar masstransporten.

För att kunna göra antaganden om olika modeller för värmetransporten bör vi först se hur stekförloppet ser ut i detalj. Från början har produkten en konstant temperatur långt under fettets smältpunkt, men över noll grader. Vid kontakten med värmekällan stiger yttemperaturen snabbt till 100°C . Detta tar ca 5 sek vid fritering och kontaktstekning medan det tar betydligt längre tid vid stekning i konvektionsugn. Samtidigt som ytan värmes börjar värme transporteras inåt genom värmeledning. Vid ca 40°C smälter fett. Detta påverkar dock inte värmetransporten nämnvärt eftersom smältvärmes för fett är bara tiondedelen av smältvärmes för is. Dessutom är fetthalten relativt låg. Smältningen sker också i ett brett temperaturintervall. Det är därför lämpligt att låta smältvärmes ingå i värmekapaciteten. Alla delar som utsättes för temperaturer över ca 60°C koagulerar, d v s proteinerna denatureras varvid vatten avskiljs. Vattnet kan dock bindas av olika gelbildande substanser, mjölkpulver, skorpmjöl etc, som ingår i receptet.

Vid koaguleringen utbildas spänningar i produkten som strävar att göra den icke-sfäriska produkten rundare. En biff blir sålunda tjockare under fritering. Vid lite högre temperatur, $80-90^{\circ}\text{C}$, avgår en del i färsen lösta gaser. Vid fritering bildas redan innan ytan nått 100°C ett relativt starkt skinn på ytan. Detta är början till stekskorpan. När 100°C uppnåtts förångas vatten innanför detta skinn och trycket stiger tills porer i skinnet vidgas så att en viss jämvikt uppkommer. Om man friterar vid låg temperatur $110-120^{\circ}\text{C}$ kan man se att ångan kommer från ca 50 porer i köttbullsytan. Man kan se dessa porer om man tittar noga på en köttbulle, som precis tagits upp ur fritösen. Porerna är

ett par tiondels millimeter i diameter. För de recept som har goda vattenhållande egenskaper och som används industriellt, är det troligen så att vattnet inte transporteras nämnvärt i produkten. Det vatten som kokar bort precis innanför stekskorpan ersätts i så fall inte inifrån, utan en fortsatt uttorkning och därmed tillväxt av stekskorpan sker. När stekskorpan tillväxer förflyttas samtidigt 100°C -isotermen inåt.

Med denna bakgrund uppräknas här ett antal tänkbara mekanismer för värmetransporten. Dessa mekanismer behandlas experimentellt och teoretiskt i kapitel 8 och 9.

1. Kokpunktsförhöjning i kokzonen. Det finns minst tre typer av sådan förhöjning: saltkoncentration och tryckförhöjning samt överhettning av vattnet.
2. En möjlighet som har samband med ovanstående är att skorpan innehåller en betydande restvattenhalt. Detta skulle då medföra att 100°C -fronten rör sig snabbare inåt.
3. Värmeöverföringstalet, α , är troligen beroende av ånghastigheten från produkten. Vid fritering bör α öka med ångavgången. Men vid kontaktstekning kan istället det skenbara α minska med ångavgången. Det skulle i så fall förklara varför hälltemperaturen vid kontaktstekning de två första minuterna inte påverkar centrumtemperaturen /2/.
4. Man kan tänka sig att vatten, förångat strax innanför stekskorpan transporteras i ångform delvis inåt och kondenserar i de kallare delarna. Detta förutsätter att långa porer finns tillgängliga och att rimlig drivkraft för nämnda transport kan antas.
5. En annan typ av portransport för ånga är termodiffussion eller som samma mekanism kallas: Ekvivalent värmeledning. Den grundar sig på att en temperaturgradient i ett poröst material skapar en vattenhaltsgradient åt motsatt håll med hjälp av samma mekanism som i punkt 4. Emellertid är det inte nödvändigt med långa porer eller någon lång-

väga vattentransport. Men resultatet blir antingen en nettotransport av vatten (allt vatten flyttar sig en liten bit inåt) eller också diffunderar vattnet tillbaka igen i sin (lilla runda) por efter uträttat ärende (avgett kondensationsvärme). Det liknar i så fall den välkända Heat-pipe-effekten.

Innan dessa olika mekanismer penetreras teoretiskt skall ett antal experimentella undersökningar presenteras. Det är dels experiment som vederlägger respektive bestyrker mekanismer, dels mätningar av parametrar, intressanta för att kontrollera modeller överhuvudtaget.

8. Experimentella undersökningar.

8.1. Masstransport i produkten.

Om det är så att vattenånga transporteras inåt och kondenserar nära centrum, kommer vattenhalten att stiga något i detta område. Det värme som alstras när vattenhalten stiger 1% (p g a kondensation) motsvarar en temperaturhöjning på ca 7°C (vilket erhålles genom att dividera ångbildningsvärmets med värmekapaciteten). Därför är vattenhaltsökningar på bara ett par tiondels procent intressanta ur värmetransportsynpunkt.

8.1.1. Vatten- och fetthaltsförändringar i centrum.

För att få en indikation på om det förekommer någon inåt-gående transport av vatten i köttbullen under fritering, mättes vattenhalten och fetthalten i ett prov på 3.4 g, som uttogs i centrum. Provtagningsmetoden är densamma som i 8.1.3. Provet vägdes och torkades över natten vid 105°C . Efter vägning igen krossades det torra provet under kloroform i en filtertratt. Efter ett antal tvättningar med kloroform sögs provet torrt, sluttorkades vid 105°C och vägdes igen. Ur viktdata beräknades vattenhalt och fetthalt. Sammanlagt 51 försök gjordes vid 1, 2, 3 och 4 minuters fritering. Regressionsanalys utfördes. Om τ är tiden i minuter blev:

$$\text{vattenhalten} = 65 + 0.2 \cdot \tau \text{ \% } (\pm 0.1 \cdot \tau)$$

Osäkerheten i vattenhaltsökningen anges av värdet inom parentes, som erhöles genom analys av konfidens intervall med 95% sannolikhet. Vattenhaltsökningen per minut är sålunda mellan 0.1 och 0.3%. Denna vattenhaltsökning är endast skenbar ty fetthalten minskar genom att en större proportion fett pressas ut från centrum. Om istället förhållandet mellan vatten- och torrsustans respektive fett- och torrsustans beräknas erhålles:

$$\text{Vatten/torrsustans} = 2.95 + 0.002 \cdot \tau \quad (\pm 0.008 \cdot \tau)$$

$$\text{fett/torrsustans} = 0.6 - 0.01 \cdot \tau \quad (\pm 0.01 \cdot \tau)$$

Man ser alltså att det inte är någon signifikant ökning av vattenhalten i centrum, medan fetthalten minskar med tvekan. Koefficienten 0.002 motsvarar ca 0.04% i vattenhalt!

8.1.2. Färgämnen som medel att registrera vattenförflyttning.

Tre olika färgämnen, med varierande vidhäftningsförmåga till proteinet, användes för att åskådliggöra eventuell vattentransport (i vätskeform) i köttbullen. Färgämnena var:

{ metylenblått
eosinrött
kaliumpermanganat.

Lösningarna var koncentrerade. De applicerades på två sätt:

- 1) Inträngning i ytan genom blötläggning i en halvtimme. Inträngningsdjupet blev ca 1 mm.
- 2) Detsamma med en 1/8-dels köttbulle, som sedan täcktes med resterande 7/8 av köttfärsen. Med detta förfarande erhöles ett inre färgat sfäriskt skal.

Tre köttbullar behandlades vid varje kombination av färgämne och appliceringsmetod. Köttbullarna friterades sedan 3 minuter i 180°C. Därefter skars de upp med ett snitt genom centrum. Snittet bedömdes subjektivt.

Inte i någon av de 18 bullarna kunde förflyttning av färgämnet synas. Slutsatsen måste därför bli att vatten (i flytande form) förflyttas varken utåt eller inåt under friteringen. I alla fall inte mer än 1 mm.

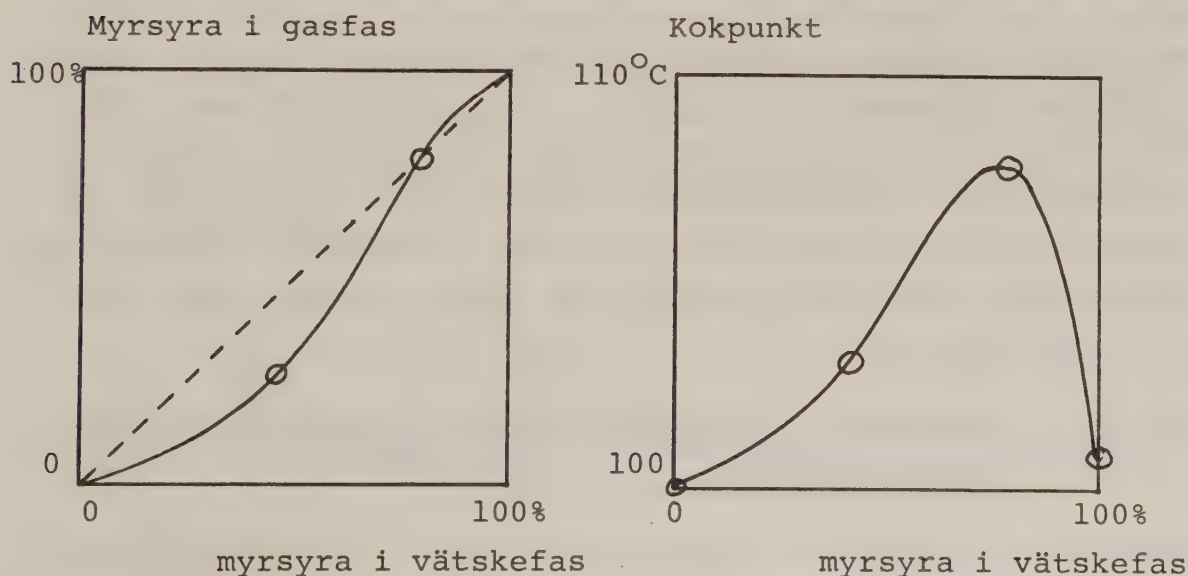
8.1.3. Myrsyra som medel att registrera förflyttning av vattenånga.

Om vatten förångas i stekytan och därifrån transporteras inåt i ångform och avger sitt värmeinnehåll genom kondensation nära centrum, så innebär det att en höjning av vattenhalten måste ske. Emellertid kunde ingen signifikant höjning påvisas, vilket dock skulle kunna tyda på en samtidig vätsketransport utåt. Eftersom det vatten, som kondenserar inte är detsamma som det som rinner ut, kan kondensationsteorin kontrolleras genom att identifiera vattnet.

Man skulle kunna använda tritiumoxid (H_2^*O). Men bl a på grund av dess farlighet prövades först med myrsyra, som liknar vatten i fysikaliskt avseende och dessutom är lätt att åskådliggöra med indikator, vilket inte går med tritiumoxid.

Myrsyra kokar vid $100,7^\circ\text{C}$ och har maximiazeotrop vid $107,6^\circ\text{C}$ för 77,5% myrsyra-vattenlösning. I ett destillationsförsök bestämdes ytterligare en punkt i jämviktsdiagrammet, nämligen 41% myrsyra i vätskefas i jämvikt med 27% i ångfas. Kokpunkten var då $103,0^\circ\text{C}$.

Följande diagram kan då konstrueras:



Figur 8.

När en köttbulle lägges i 30%-ig myrsyra, kommer syran att diffundera in i ytskiktet och spädas. Kokpunkten kan, som framgår av diagrammet, högst bli 102°C , men efterhand ökar kokpunkten till maximalt 107°C , då azeatropen utbildats. Detta går emellertid relativt sakta. I stort sett torde man kunna anta att myrsyran uppför sig som vatten, särskilt då oljebadets temperatur är hög.

I alla de följande försöken med myrsyra, friterades bullar 3 min vid 180°C . De var tempererade vid $+5^{\circ}\text{C}$. Använd indikator var bromkresolgrönt 10 gånger normalkoncentrationen. Den har omslagsområdet gult-blått vid $\text{pH} = 3.8 - 5.4$. Även bromfenolblått prövades (gult-blått, $\text{pH} = 3.0-4.6$), men den visade sig ha för surt omslagsområde för att kunna spåra utspädd myrsyra.

Tre metoder för att påvisa myrsyran användes:

- 1) Inblandning av indikator i köttfärsen.
- 2) Sprayning av indikator på en snittyta genom köttbullens centrum.
- 3) Kvantitativ mätning av myrsyrakoncentrationen.

Den första och andra metoden var enkel men otillräcklig. Den tredje var omständig men gav fullt tillfredsställande noggrannhet.

8.1.3.1. Inblandning av indikator i köttfärsen.

Bullarna frystes om och tinades som vanligt. Före friteringen blötlades bullarna i 30% myrsyra i 0, 2 och 5 minuter. Alla tre fallen gav samma resultat - inga gula spår i det blå centrumsnittet. Däremot fanns ljusa fläckar, vilket kan ha berott på att indikatorn ej var jämnt inblandad. Då dessutom färsen blev spröd vid ombakningen, måste metoden anses som otillförlitlig.

8.1.3.2. Sprayning av indikator på en snittyta genom köttbullens centrum.

Köttbullen blötlades i 30% myrsyra i 0, 5, 10 och 30 minuter. Fem köttbullar användes för varje blötläggningstid. Efter

fritering delades bullarna genom centrum med ett tunt sågblad. Indikator sprayades på snittytan. Inte heller i detta försök syntes några gula färgspår och för övrigt inga gula fläckar heller. Däremot syntes en skarp gul ring vid ytan, vilket visar att myrsyra tränger in i ytan. Ringens tjocklek ökade med blötläggningstiden.

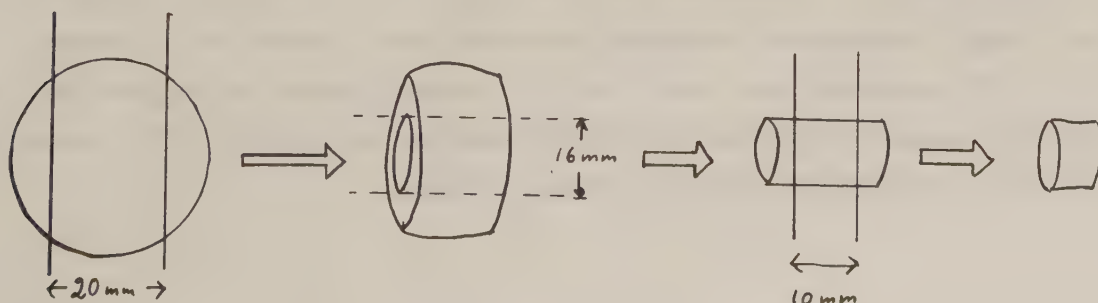
Prov gjordes, som visade att indikatorn slog om från blått till grönt vid 0.05% och från grönt till gult vid 0.1%. Man kan alltså tänka sig att myrsyrakoncentrationen i bullens centrala delar varit maximalt 0.1%, vilket motsvarar en vattenhaltsökning på högst 1% om man antar att den myrsyra, som destillerar inåt håller minst 10%. Den använda indikatorn har tydligen ett något för surt område, men å andra sidan finns det ingen annan lämplig indikator.

Ändå gav indikatormetoden det resultatet att vattenhaltsökningen i centrum i alla fall inte överstiger 1% vid fritering 3 min vid 180°C.

8.1.3.3. Kvantitativ mätning av myrsyrakoncentrationen.

Genom att efter fritering röra ut ett centrumprov i vatten och mäta pH, kan man få ett mått på mängden myrsyra. Förutsättningen är då att nollprov utföres med känd syramängd.

Bullarna blötlades 0, 10, 30 och 90 min i 30% myrsyra. Efter friteringen delades bullen med dubbelsåg (bladavstånd 20 mm). Därefter utstansades en cylinderformad bit ur skivan ($\emptyset = 16$ mm), som sågades av igen med dubbelsåg (bladavstånd 10 mm). Detta omständiga förfarande att få fram en cylinder ur centrum användes för att inte få med myrsyra från ytan via verktygen.



Figur 9.

Centrumbiten som var ca 2 ml, rördes ut i 18 ml vatten. Mätning av pH utfördes. Nollproven, som inte alls hade ytbehandlats med syra, tillsattes en känd mängd myrsyra medan provet var varmt. Sedan tillsattes vatten så att totalvolymen även här blev 20 ml.

Tabell 1. Resultat av pH-mätning.

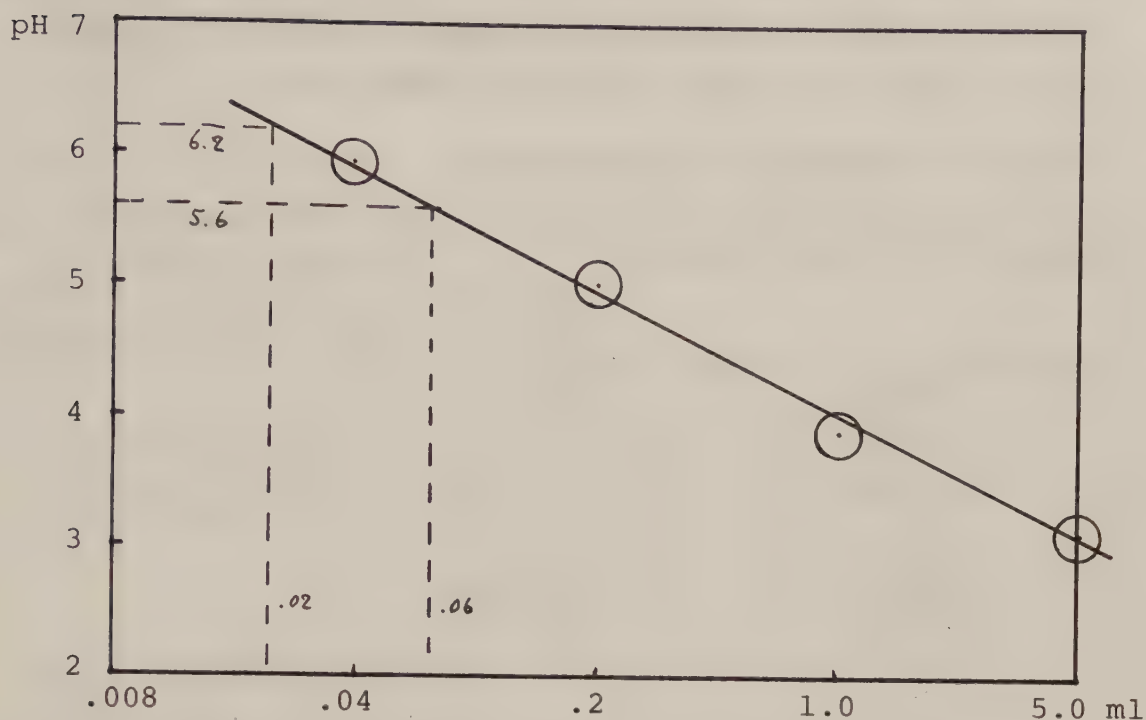
Tillsats av 1% myrsyra	Blötläggningstid			
	0 min	10 min	30 min	90 min
0 ml	(6.3)			
0.04 ml	5.9			
0.2 ml	5.0			
1 ml	3.9			
5 ml	3.1			
-		6.1	6.3	5.6
-		6.2	6.2	5.5
-		6.2	6.1	5.3
-		6.2	6.2	5.7
-		<u>6.3</u>	<u>6.1</u>	<u>5.9</u>
medelvärde		6.2	6.2	5.6

Ur det logaritmiska diagrammet i figur 10, som uppritats för ovanstående värden utläses att för:

pH = 6.2 erhålles 0.02 ml 1% myrsyra

pH = 5.6 erhålles 0.06 ml 1% myrsyra.

Om man bortser från det högre värdet, som troligen beror på för lång blötläggningstid erhöles alltså med denna metod 0.02 ml 1%-ig myrsyra i ett prov på 2 ml, vilket motsvarar 0.01% myrsyra i centrum av bullen, som i sin tur betyder att den förmodade vattenhaltsökningen i centrum stannar vid 0.1% (förutsatt att den inåt transporterade myrsyran håller 10%). Denna vattenhaltsökning skulle ge upphov till mindre än 1°C ökning av centrumtemperaturen.



Figur 10.

8.1.3.4. Mätning av myrsyrakoncentrationen i ytskiktet

Det har antagits att den myrsyra som eventuellt destillerar in har koncentrationen 10%. För att kontrollera det och för att få en föreställning om hur syran fördelar sig och hur djupt den tränger in gjordes följande försök:

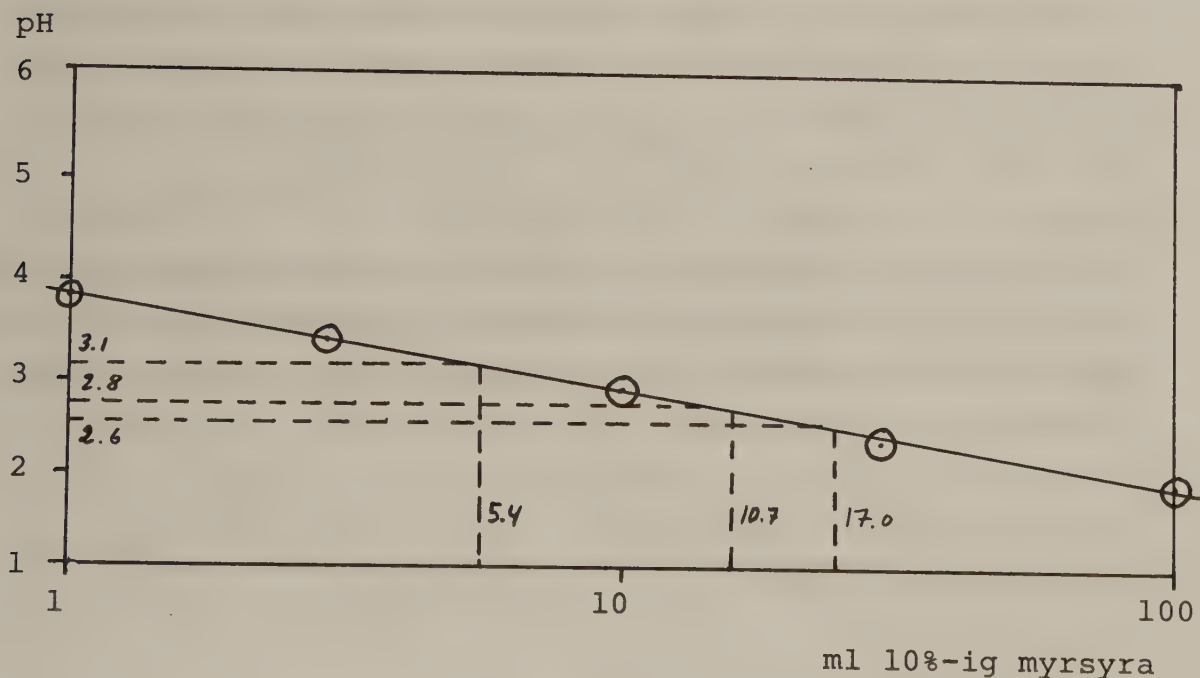
Köttbullar blötlades i 30%-ig myrsyra 0, 10, 30 och 90 min. De togs upp och sköljdes i vatten i 5 sekunder, mosades sedan med 100 ml vatten under fem minuter, pH mättes. Efter en halvtimme och ytterligare mosning i två minuter, kontrollerades pH igen.

Till nollproven sattes 10%-ig myrsyra före mosningen, men totala vätskemängden justerades ändå till 100 g. Parallellt gjordes mätningar av den gula ringens tjocklek på andra bullar, som också legat i myrsyra samma tider.

Tabell 2. Resultat av pH-mätning.

Tillsats av 10%-ig myrsyra	Blötläggningstid			
	0 min	10 min	30 min	90 min
0 ml	(6.2)			
1 ml	3.8			
3 ml	3.3			
10 ml	2.8			
30 ml	2.3			
90 ml	1.9			
-		3.1	2.7	2.5
-		3.1	2.8	2.6
medelvärde		3.1	2.8	2.6

Följande logaritmiska diagram kan då konstrueras:



Figur 11.

Ur diagrammet utläses:

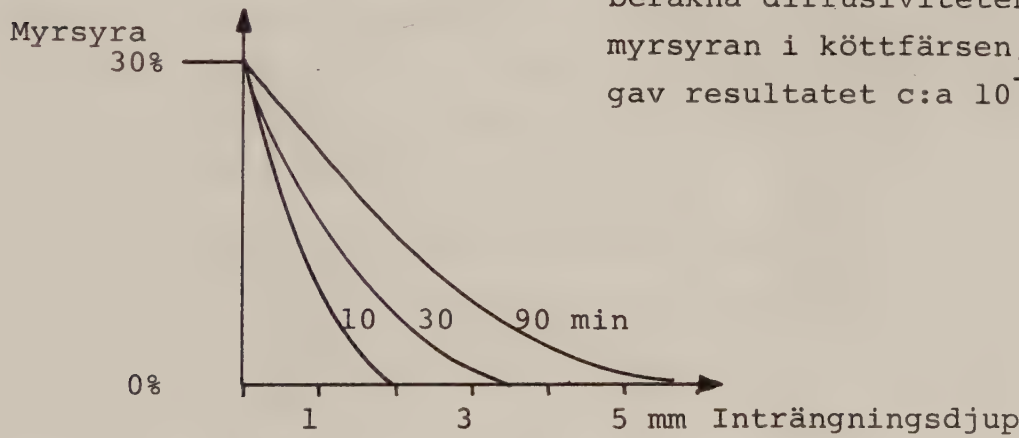
Blötläggningstid (min)	10	30	90
10% myrsyra (ml)	5.4	10.7	17.0

Den gula ringens tjocklek mättes och därav beräknades ringens volym för att få fram medelkoncentrationen av myrsyra.

Tabell 3.

Blötläggningstid (min)	10	30	90
Gula ringens tjocklek (mm)	2.0	2.5	6.5
	2.0	3.5	5.5
medelvärde	2.0	3.5	6.0
Gula ringens volym (cm ³)	5.66	8.98	12.97
Medelkonc. myrsyra (%)	10	12	13

Om myrsyradiffusionen följer normala lagar, bör myrsyra-fördelningen se ut ungefär som i figur 12. Man kan då också beräkna diffusiviteten för myrsyran i köttfärsen, vilket gav resultatet c:a 10^{-8} m²/s.



Figur 12.

8.1.3.5. Sammanfattning av myrsyraförsöken.

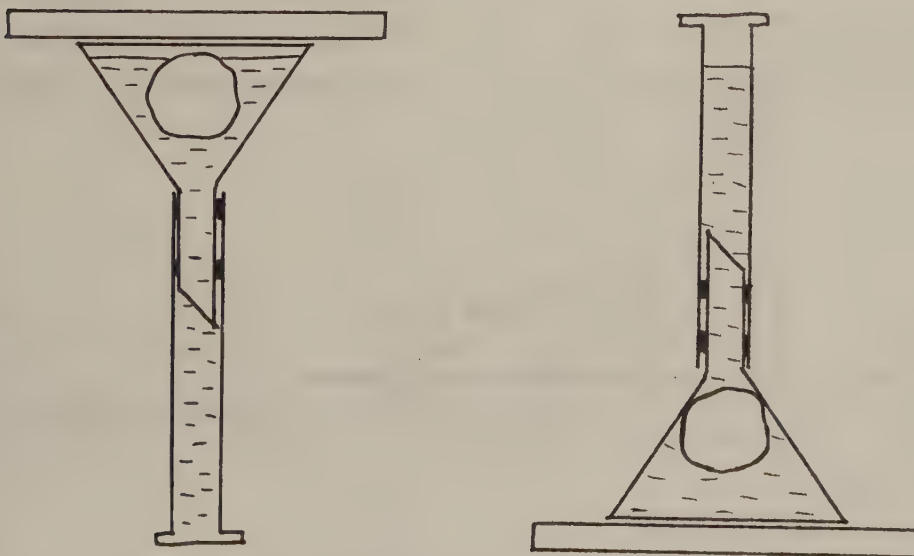
Någon förflyttning av vatten, i form av ånga eller vätska, som kan förklara den höga och oljetemperaturberoende värmetransporten, kan ej upptäckas med hjälp av myrsyra.

8.2. Porositet och svällning.

Diffusion av vatten i köttfärs har ett långsamt och ur värmetransportsynpunkt helt försumbart förlopp. Därför fordrar vattentransport i någon form att det finns porer tillgängliga. Det kan vara långa öppna eller korta slutna porer för respektive mekanism 4 och 5 i kapitel 7 (sid 16). En del undersökningar av porositet gjordes därför på köttbullar av samma recept och storlek som tidigare. De friterades vid olika tid-temperaturkombinationer. Därefter utfördes mätningar. Det var av stor betydelse att i synnerhet nedanstående täthetsmätning gick snabbt, eftersom köttbullar skruppnar relativt fort, sedan de tagits upp ur fritösen. Olika metoder prövades. En både snabb och noggrann metod beskrives nedan.

8.2.1. Täthet som funktion av tid och temperatur.

På ett smalt 25-ml mätglas fixerades en trätt, lagom stor att rymma en köttbulle. Ett lock med tätslutande undersida kunde placeras på tratten.



Figur 13.

Mätningen tillgick så att den ur fritösen uppfiskade köttbullen lades i den vätskefyllda tratten, locket lades på, apparaten vändes 180° , varefter mätglaset avlästes. Genom att subtrahera detta värde från ett utan köttbulle, tidigare avläst värde erhöles volymen. Vägning utfördes också omedelbart efter avläsningarna, varvid köttbullens vikt erhöles efter subtraktion.

Mätningarna gjordes vid 100, 130, 160 och 190°C oljebadstemperatur och efter fritering av 1, 2, 3, 4 och 5 min. Resultaten är uppritade i figur 14. Vikt hos råa bullar var hos fyrtio stycken i medeltal 18.0 gram. Spridning ± 0.7 gram. Ursprunglig diameter var 0.0320 m, vilket ger en täthet på 1050 kg/m^3 .

8.2.2. Mätning av porfördelning genom fotografering av tunna snitt.

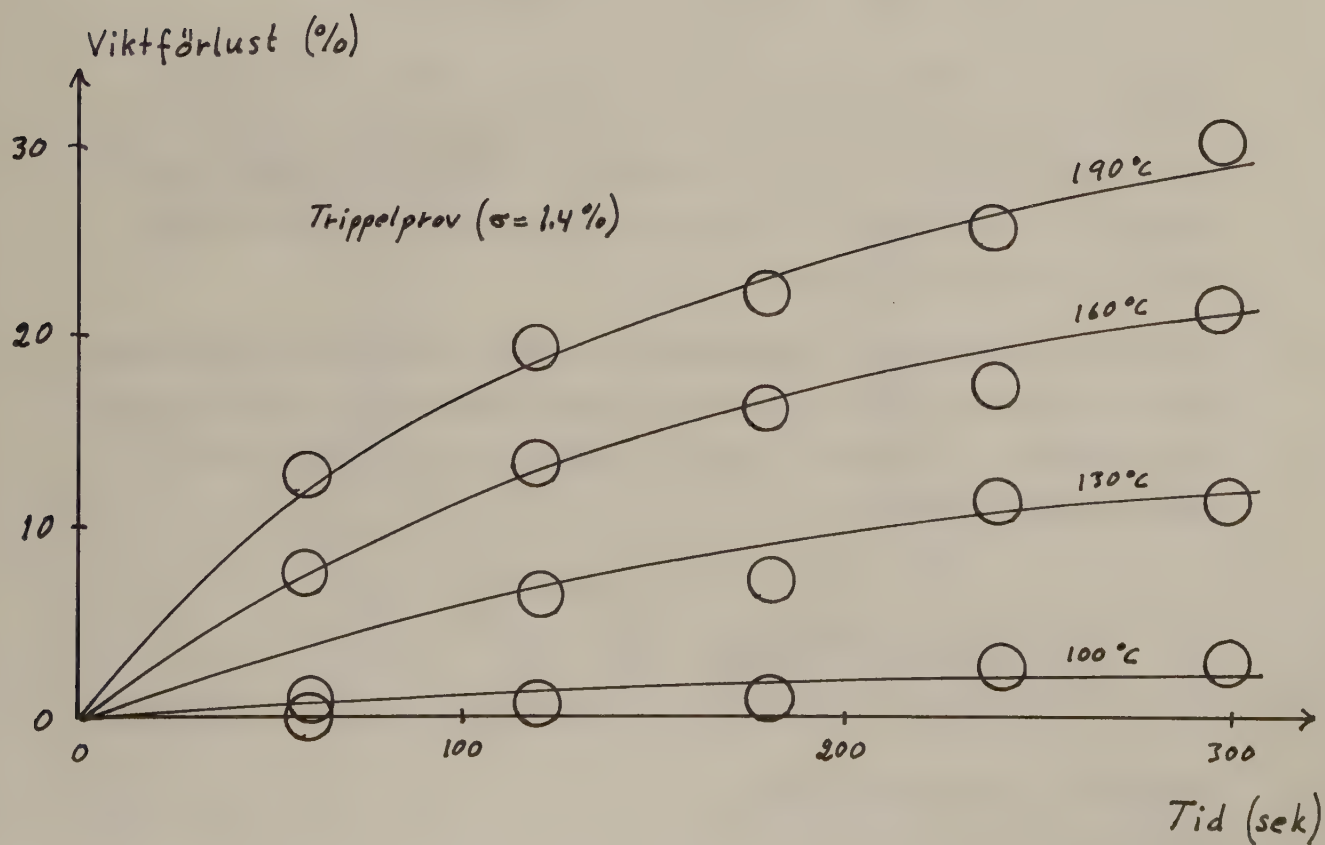
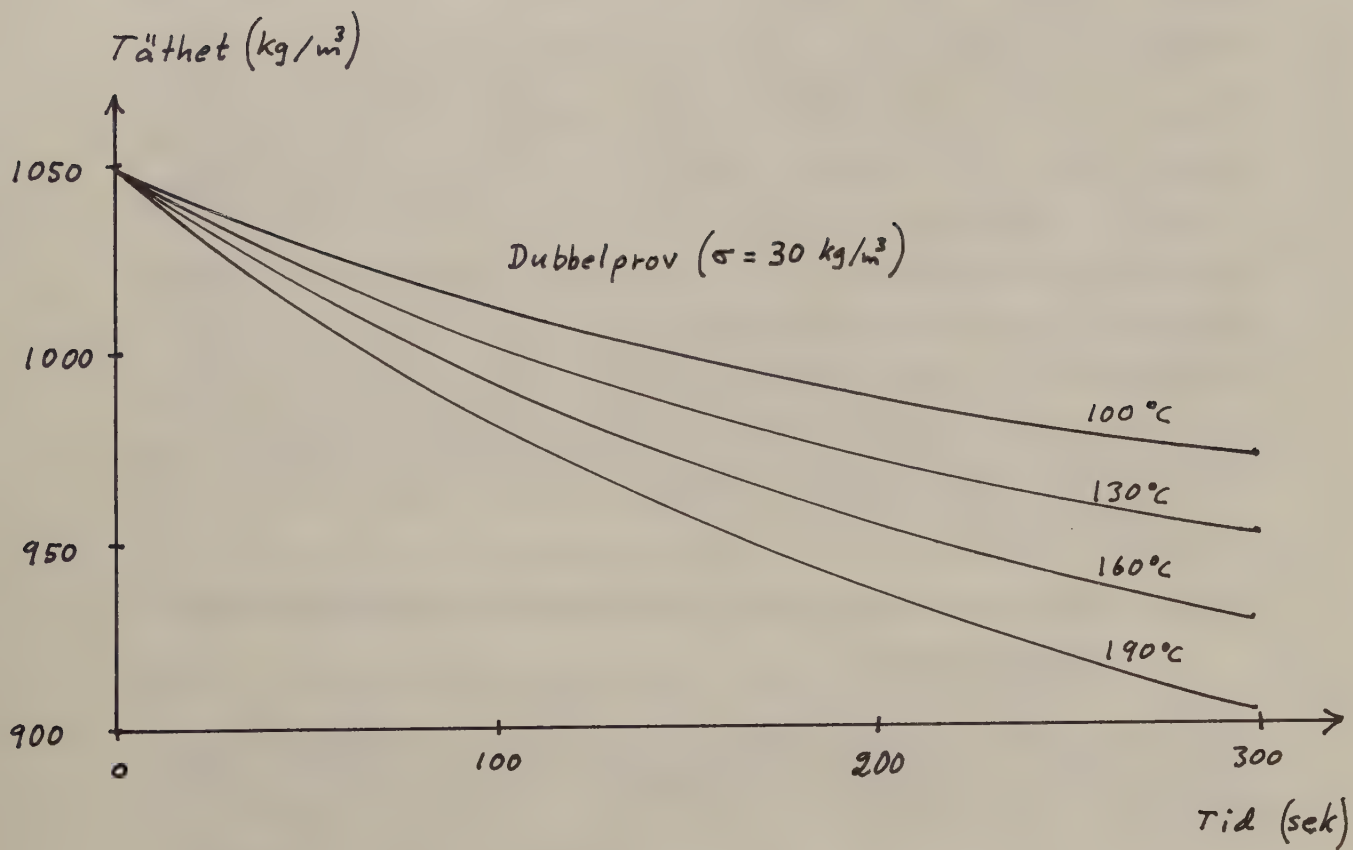
Förändringar i köttfärsens porstruktur har undersökts genom att genomlysa och fotografera tunna snitt av köttbullar, som friterats 3 min vid 130, 160 och 190°C . Resultatet är av värde främst vid framtagning av värmetransportmekanismen utöver ren värmeledning.

Porerna var sfäriska, men en enstaka avlång por kunde ibland upptäckas. En typisk bild kan beskådas i figur 15. De större mörka fälten är lökbitar. På originalfotografierna är det mycket lättare att avgöra vad som är hål och vad som är substans.

Porens diameter är i genomsnitt större än hålets på bilden. Om vi kallar porens diameter d och hålets h , så ger enligt härledning i bilaga 1, poren upphov till ett hål med i genomsnitt diametern

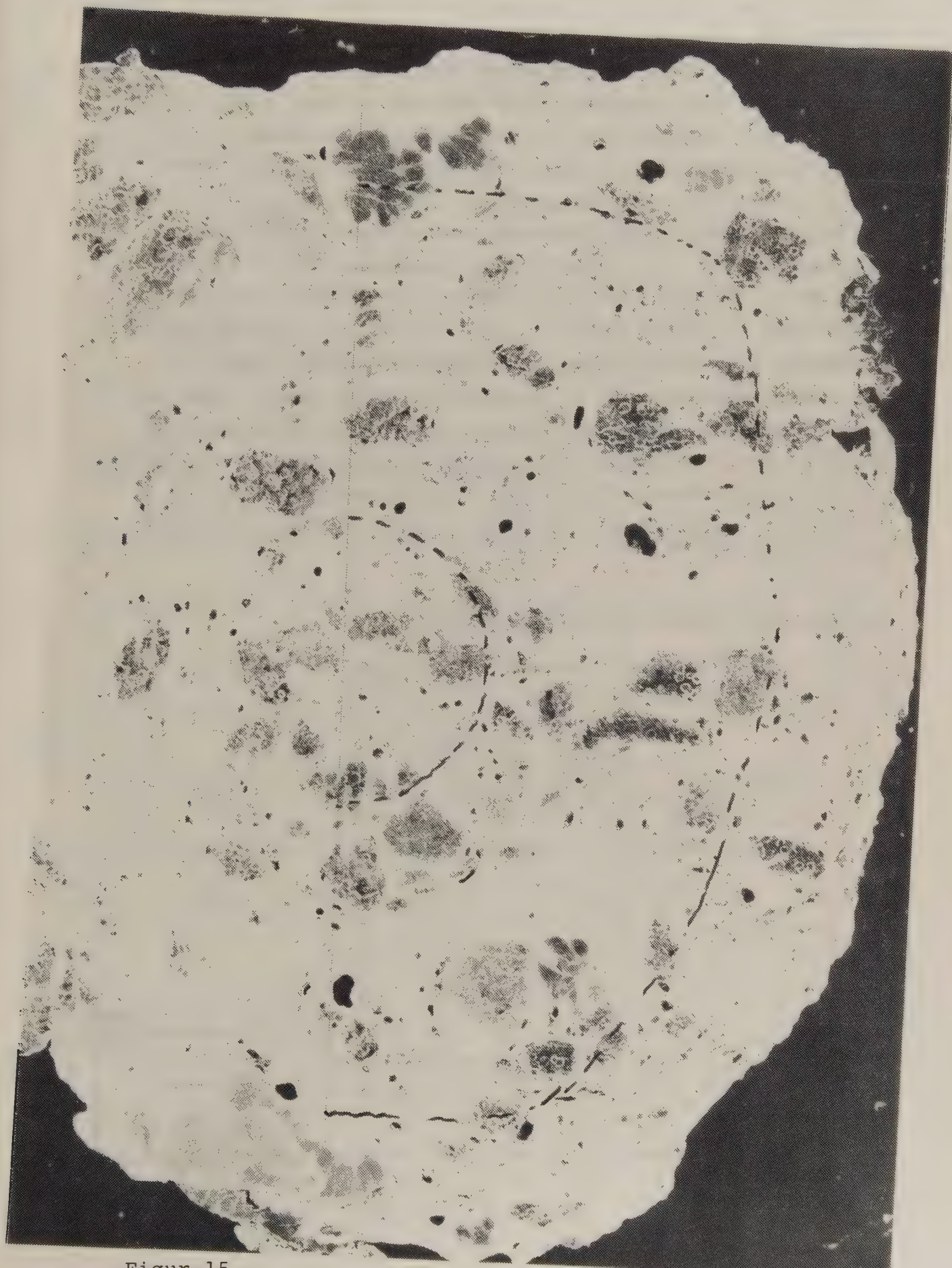
$$\bar{h} = \frac{d^2}{2(d-\delta)} \cdot \left[\cos^{-1} \left(\frac{\delta}{d} \right) - \left(\frac{\delta}{d} \right) \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\delta}{d} \right)^2} \right]$$

där δ är snittjockleken.



Figur 14.

Fotografi av ett centrumsnitt i en köttbulle.



Figur 15

Härur kan håldiameter för vissa klassgränser bestämmas. Dessa fastlades till 0.3 och 0.7 mm, vilket vid $\delta = 0.2$ mm och en förstoring på 7.5 gånger gav håldiametrarna 1.2 och 3.7 mm. På sidan 31 har det utvärderade resultatet presenterats. Varje diagram innehåller fördelningen av antal porer av en viss storlek, från centrum (origo) till ytan. Det är ingen signifikant skillnad mellan portätheten vid ytan, mitten eller centrum, utom vid 160°C men det finns ingen anledning att antaga att det inte är en ren tillfällighet. Därför kan lägesvariabeln uteslutas, vilket betyder att ett vägt medelvärde framräknas från centrum till ytan. På sidan 32 visas först fyra diagram med portäthet som funktion av porstorlek, sedan tre diagram med portäthet som funktion av friteringstemperatur. Man kan dra den slutsatsen att ju mindre porerna är desto fler har man per ytenhet. Och oberoende av storlek så ökar de i antal efter stekningen till ungefär dubbla antalet (streckat). Oljebadstemperaturen har knappt någon inverkan, utom då det gäller stora porer, som ökar i antal med högre oljebadstemperatur.

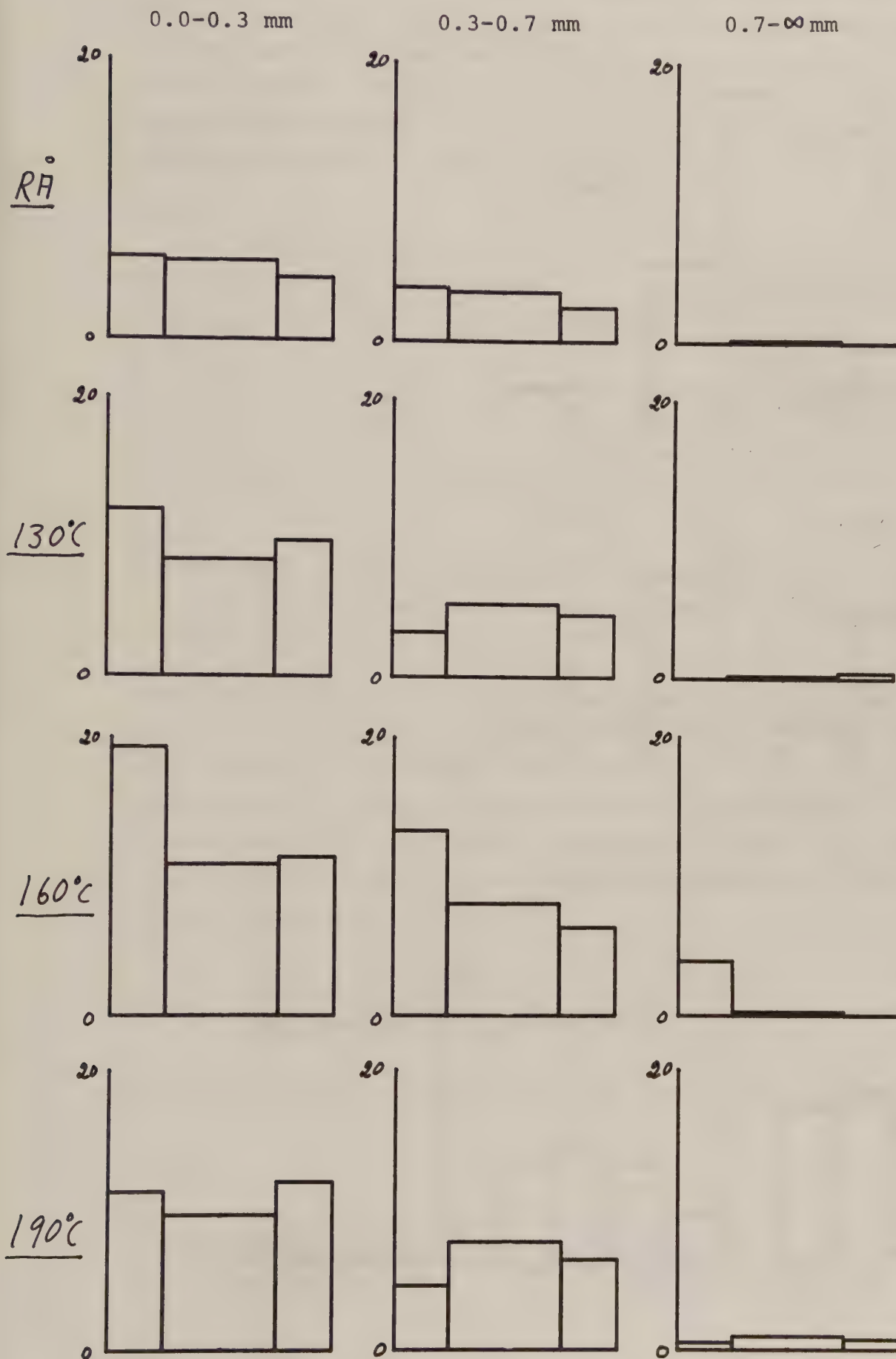
8.2.3. Slutsatser angående porositet.

Porositeten ψ för ett prov med n porer per cm^2 , där por-diametern är d kan antas vara:

$$\psi = \left(\sqrt{\frac{\text{poryta}}{\text{snittyta}}} \right)^3 = \left(\frac{\sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot n}}{1} \right)^3 = \frac{\sqrt{\pi}^3}{8} \cdot d^3 \cdot \sqrt{n^3}$$

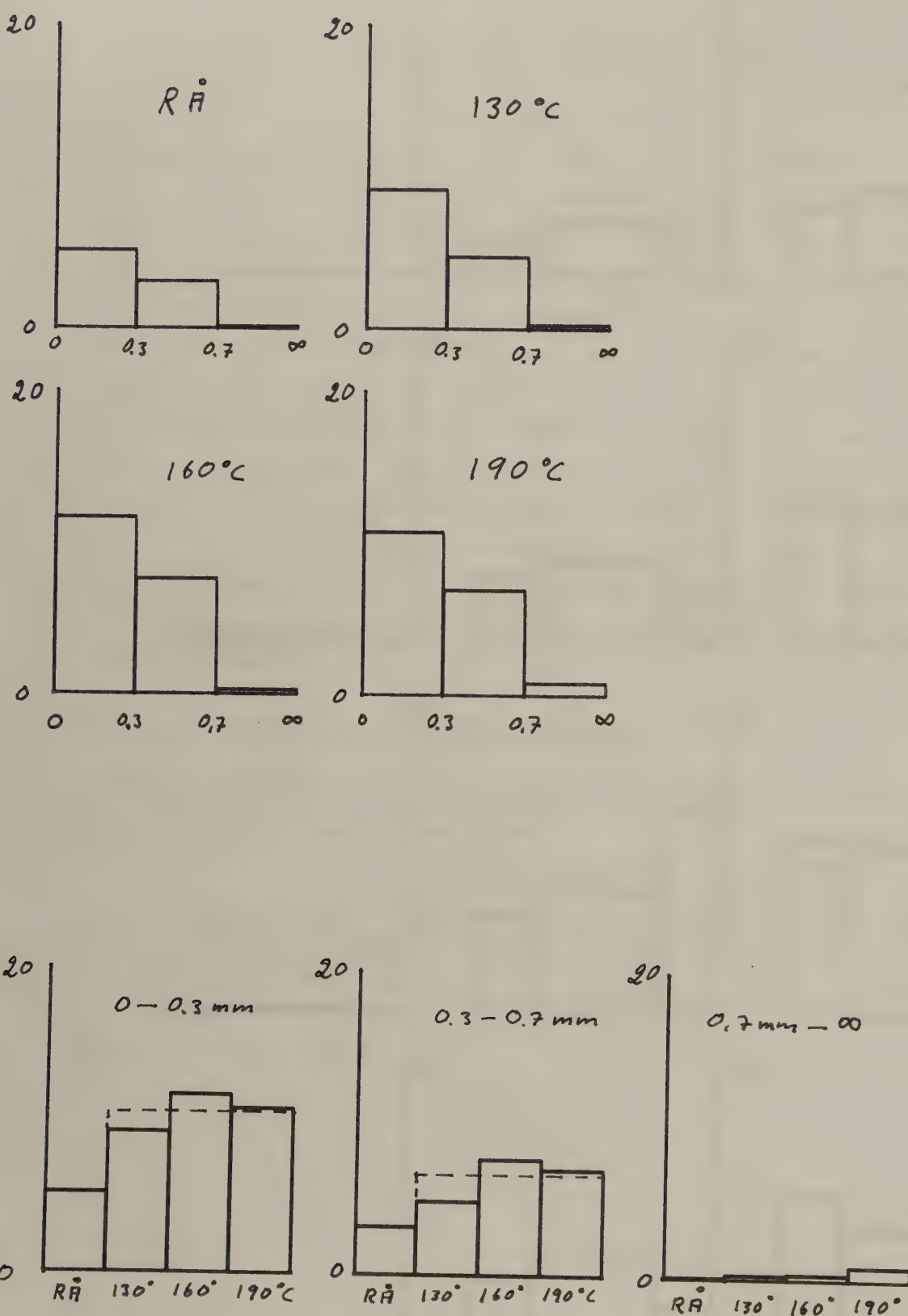
$$\psi = 0.7 \cdot d^3 \cdot \sqrt{n^3} \quad (5)$$

Antal porer per cm² snittyta (medelvärden av 3 bilder)



Figur 16.

Antal porer per cm^2 snittyta (medelvärden av 9 bilder).



Figur 17.

Ett approximativt värde på den råa köttfärsens porositet kan fås genom att anta att bara tre typiska pordiametrar är för handen. Ur det övre vänstra diagrammet på sidan erhålles portätheten. Porositetsbidragen från de olika pordiametrarna kan sålunda beräknas.

Tabell 4.

pordiameter	portäthet	porositetsbidrag
0.2 mm	5.2 porer/cm ²	0.000066
0.6 mm	3.0 "	0.000786
1.0 mm	0.2 "	0.000063
porositet 0.000915		

Porositeten utgöres av bidragens summa, d v s 0.0009 eller ca 0.1%. Denna porositet är helt försumbar i värmetransport-sammanhang.

Efter fritering tre minuter är emellertid porositeten större. Men eftersom köttbullarna drar ihop sig igen någon minut efter att ha lämnat frityrbadet, så kan ingen relevant utvärdering av just porositeten göras ur materialet i punkt 8.2.2., utom för rå köttfärs. Däremot kan man få ett mått på porositeten med hjälp av täthetsdiagrammet på sidan enligt formeln:

$$\psi = 1 - \frac{\text{täthet}}{\text{täthet för rå färs}}$$

Efter fritering i t. ex. 3 min fås ur täthetsdiagrammet (fig 14)

Tabell 5.

Friteringstemperatur (°C)	Porositet (%)
100	5.5
130	7.0
160	8.5
190	10.0

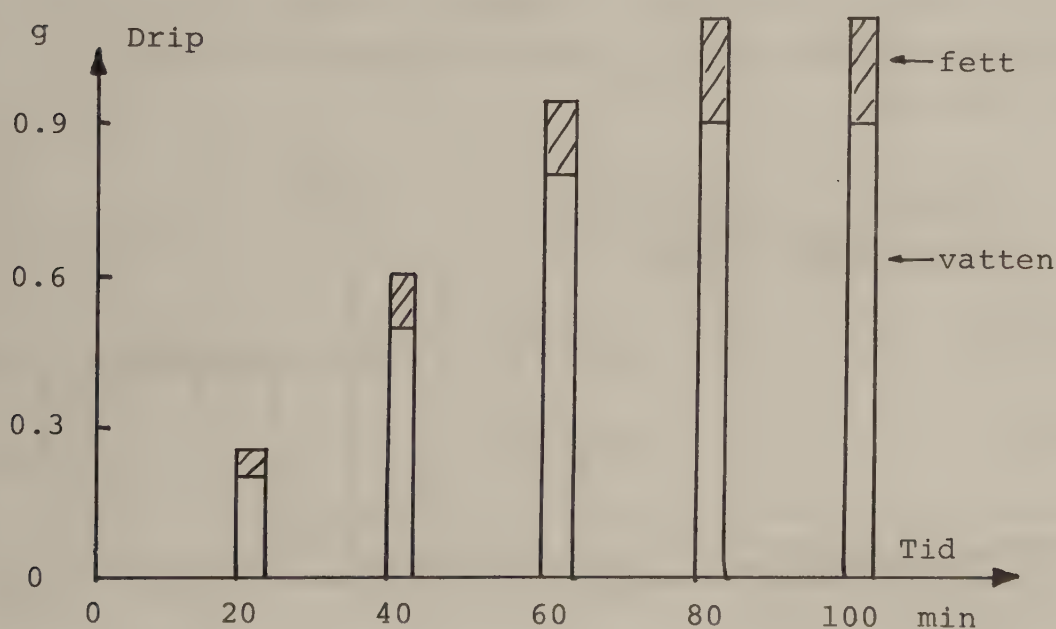
8.3. Vattentransport från produkten.

Viktsförlusten, som med tillräckligt god approximation är detsamma som vattenförlusten, är sammansatt av två typer av vattenförlust eller svinn, som det ofta kallas i industrin. Det ena är förångningsförlust (evaporation loss) och det andra är drip (drip loss).

8.3.1. Mätning av drip.

Drip uppstår då köttproteinerna denatureras och köttfärsen därför koagulerar, d v s den drar ihop sig och blir grå och elastisk. Detta sker vid ca 60°C . Det vatten, som spjälkas från proteinstrukturen pressas ut ur köttbullen genom sprickor och porer. Drippet kan mätas på flera sätt.

Vid ett försök lades köttbullar i täta plastpåsar och värmdes i fettbad vid 95°C i 20, 40, 60, 80 och 100 min. Efter värmebehandling tömdes påsarna på drip, som visade sig bestå av ca 0.9 g vatten och 0.2 g fett. Detta motsvarar alltså 5% vatten och 1% fett. Det fett som avrinner vid fritering ersättes av ytabsorberat friteringsfett så att fettbalansen blir kvantitativt ungefär orubbad. Resultatet framgår av följande stapeldiagram:



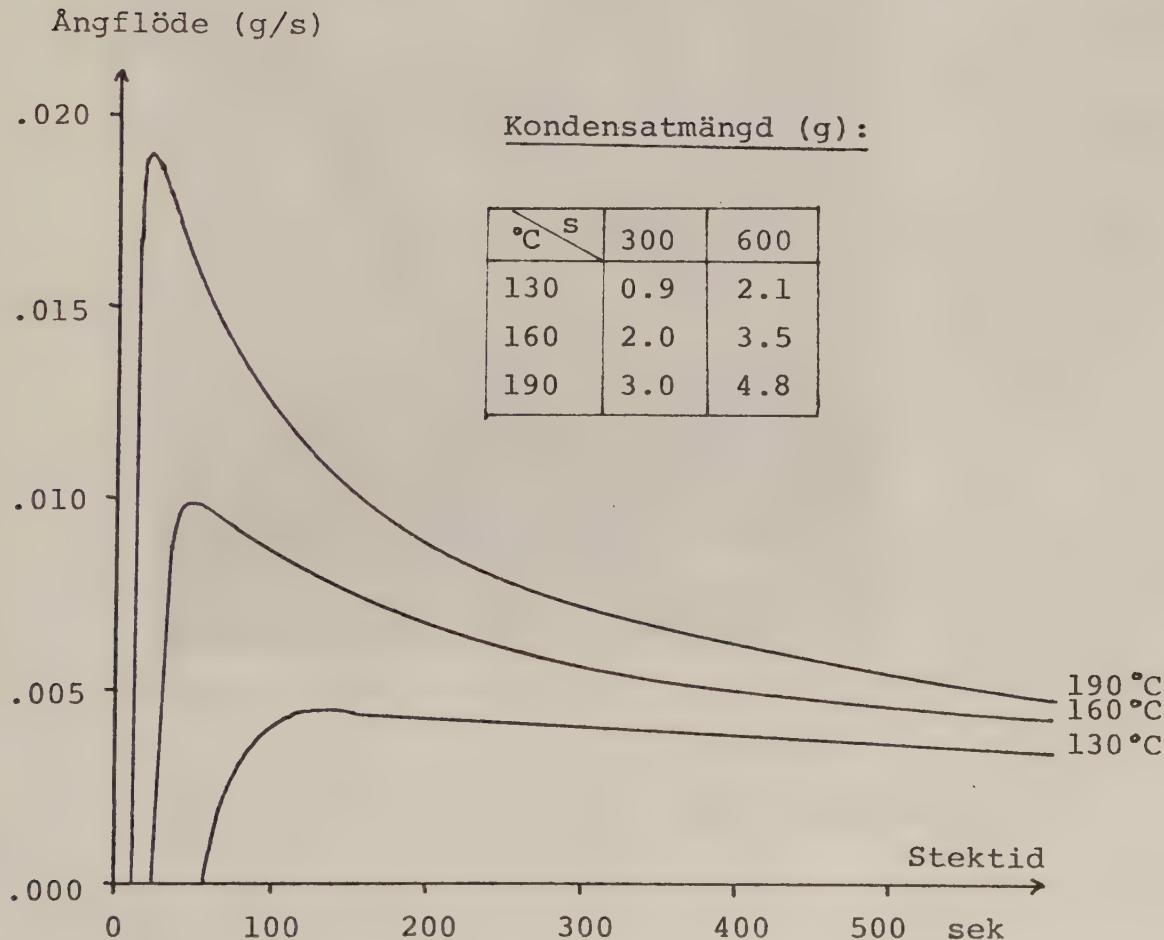
Figur 18.

Som man ser tar det upp till en timme innan allt drip har pressats ut.

Ett annat försök gick ut på att under fritering låta drippet rinna ned i en glastratt som mynnade i en kylare, där friterfettet hölls vid ca 70°C . Apparaten är avbildad nedtill i bilden på nästa sida. Resultatet av friteringar upp till 5 min vid 100, 120, 140, 160 och 180°C gav inget som helst drip. Detta får tydas så att för detta industriella recept, vätskan pressas ut så långsamt att den bara ersätter kokförlusterna i ytan.

8.3.2. Mätning av ånga.

En apparat har tillverkats för att under fritering av köttbulle kunna ta upp all ånga som avges från bullen och mäta dess flöde som funktion av tiden. Se figur 20.



Figur 19.

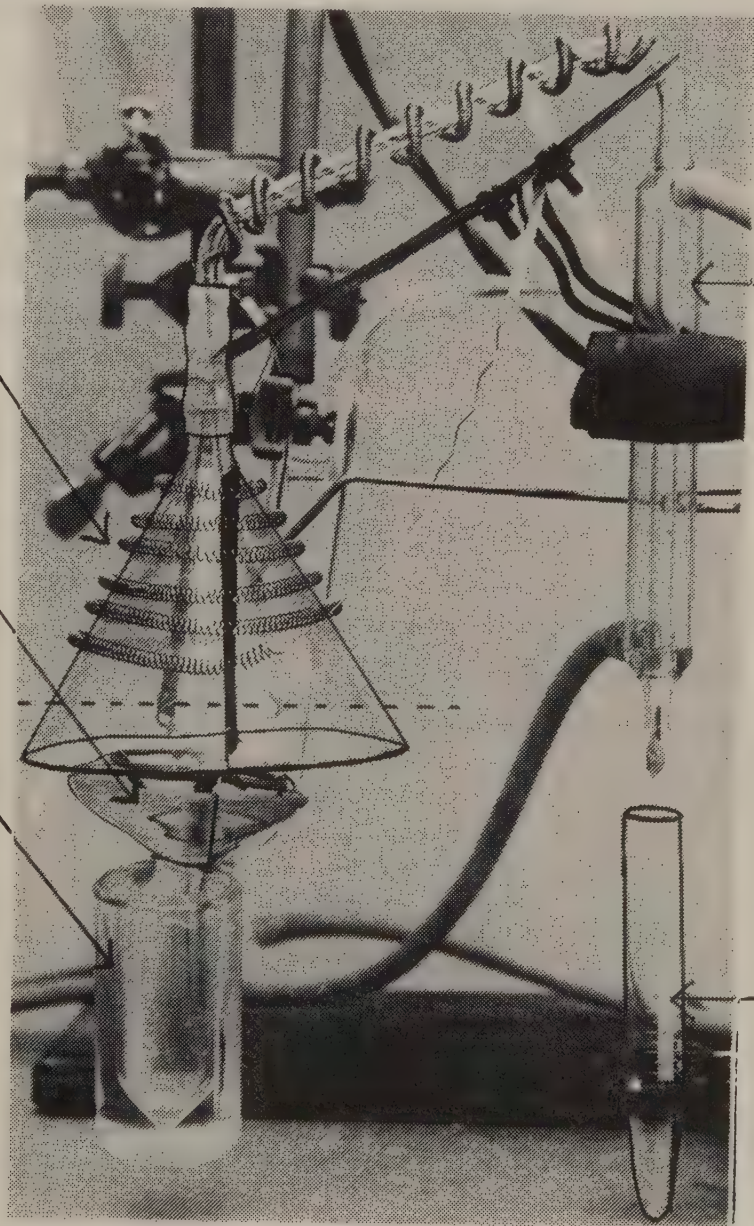
I kylaren kondenserar
all ånga.

Uppsamlingsratten är upp-
värmad av en slinga för
att hindra att ångan
kondenserar och hamnar
i dripkylaren.

Hållaren är trattformad
med hål nedtill som
mynnar i kylaren.

Mantlad dripkylare. I
manteln som är kopplad
till vattensug, kokar
vatten vid 70°C .

Mätrör



Den streckade linjen anger fettnivån.

Figur 20.

Ångan samlas upp i tratten, som är uppvärmd av en elektrisk spiral för att förhindra kondensation. I kylaren kondenseras ångan och droppar ned i ett rör på en elektronisk våg som kontinuerligt väger röret. Vågen är kopplad till en datalogg, som var tionde sekund stansar vikten på en hållremsa. Via remsan hamnar data slutligen i en bordskalkylator där data deriveras numeriskt och uppritas med tillhörande plotterutrustning.

Friteringar utfördes vid 130, 160 och 190°C. Vid varje temperatur gjordes fem försök. Medelvärdeskurvor har ritats på sidan 35. Ytan under kurvorna är kondensatmängden. Den i figuren insprängda tabellen visar kondensatmängden efter 300 och 600 sekunder. Viktsförlusten efter 300 sekunder beräknat ur den nedre figuren på sid 28 är 2.1, 3.7 och 5.2 gram vid resp 130, 160 och 190°C. Detta stämmer ej överens med kondensatmängden i ovanstående försök. Orsaken är ännu ej helt klarlagd, men troligen får man förluster i friteringsfettet och i kylaren. Vissa förluster till friteringsfettet kan möjligen vara att vattenånga löser sig (eller emulgeras?) i fettet. Andra förluster kan vara att små ångblåsor tar sig under tratten och ut i badet.

När det gäller ångkvantiteter kan alltså försöket inte ge mer besked än att det bildas minst så och så mycket ånga. Däremot visar försöket efter hur lång tid ångan börjar komma och när maximalt ångflöde inträffar. Det är två viktiga parametrar, som är bra när man jämför experiment med en matematisk modell.

Tabell 6. Tid för ångflödets början och maximum (sek):

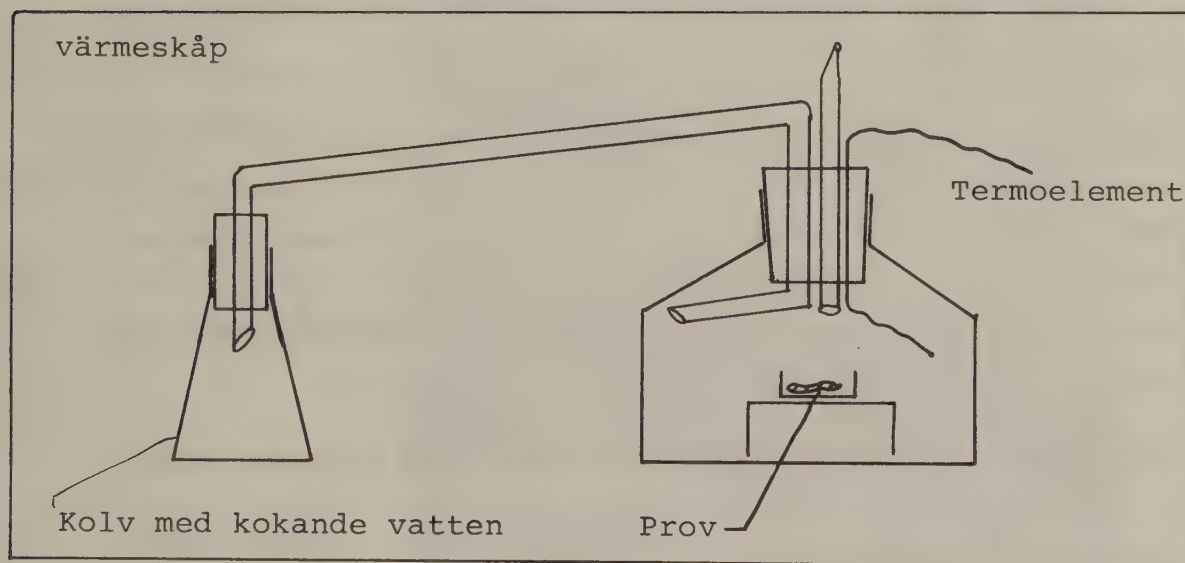
	början	max	början (subj)	max (subj)
130°C	55	130	50 ± 15	120 ± 30
160°C	20	45	10 ± 3	40 ± 15
190°C	10	20	4 ± 2	11 ± 3

De två sista kolumnerna är den subjektivt uppskattade tiden. Om man drar ifrån ca 10 sekunder från de första två kolumnerna så överensstämmer det bra. Det är nämligen ca 10 sekunders fördröjning i ångregistreringsapparaturen.

8.4. Vattenhalt i stekskorpan.

I den i kapitel 6, figur 6, använda matematiska modellen antogs stekskorpan vara absolut torr. I verkligheten bör det dock finnas en vattenhaltsprofil, som vid 100°C -isotermen ligger på ungefär ursprungsvattenhalten och vid ytan sjunkit till nästan noll. Medelvattenhalten i stekskorpan har avgörande betydelse för hur snabbt skorpan tillväxer och därmed också betydelse för centrumtemperaturen.

En enkel apparat byggdes för att kunna mäta vattenhaltskurvor över 100°C . Konstruktionen framgår av figur 21.



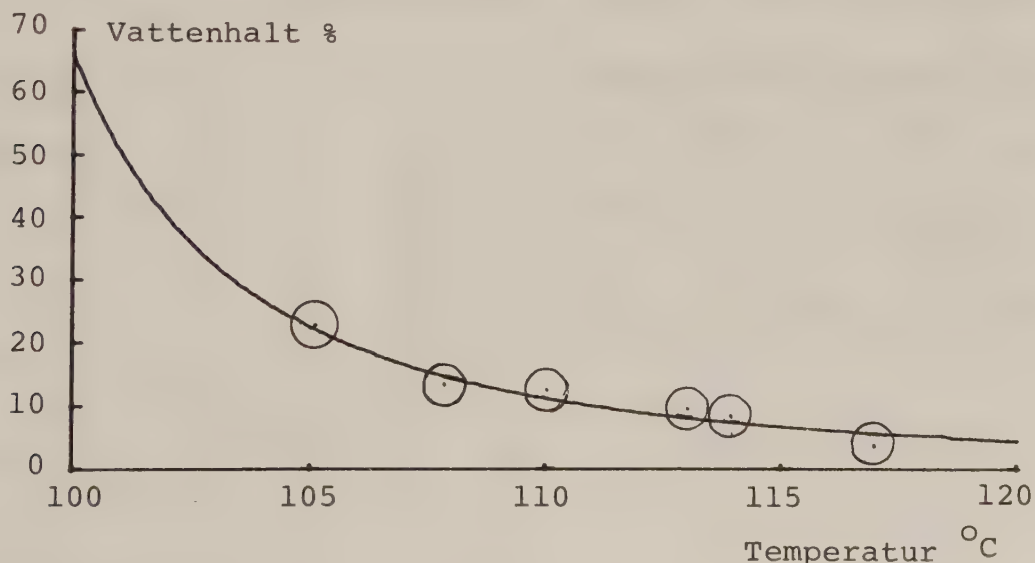
Figur 21.

I ett värmeskåp befinner sig ett kärl, som innehåller provet. Kärlet matas med ånga från en kolv med långsamt kokande vatten. Värmeskåpets temperatur inställdes på ett visst värde och efter viss tid vid konstant temperatur uppnås jämvikt mellan vattenångan och vattenhalten i stekskorpeprovet. Eftersom atmosfären i kärlet innehåller bara vattenånga är det lätt att, om man så önskar, beräkna den relativa fuktigheten som funktion av temperaturen.

Om vi avsätter vattenhalten som funktion av den relativa fuktigheten erhålles ingen sorptionsisoterm utan en sorptionskurva där temperaturen varierar längs kurvan. Men denna sorptionskurva är riktigare att använda vid simulering av stekning, eftersom stekskorpan också i verkligheten har en temperaturprofil och en atmosfär av i stort sett ren överhettad ånga.

Vattenhalten avsättes därför istället mot temperaturen varefter ett matematiskt samband kan anpassas till punkterna.

Försöken visade att jämviktsinställning tar ca tre timmar för provmängden 100 mg. Det visade sig inte ha någon betydelse om man startade med torr eller våt stekskorpa eller ett köttfärsprov. Jämviktsvattenhalten blev ändå ungefär densamma. Resultat av dubbelprov vid sex olika temperaturer redovisas i figur 22.



Figur 22.

Ett antal olika regressionsmodeller prövades. Följande empiriska ekvation visade sig passa relativt bra till de experimentella data:

$$c = c_0 \cdot \left(\frac{100-93}{t-93} \right)^2 \quad (6)$$

Den är inritad i figur 22. Begynnelsevattenhalten är c_0 .

Om man antar att stekskorpans temperaturprofil är linjär erhålles efter integrering (se bilaga 2) medelvattenhalten:

$$\bar{c} = c_0 \cdot \frac{100-93}{t_R-93} \quad (7)$$

Denna formel visar att medelvattenhalten i stekskorpan är 17% vid 120°C ytttemperatur och 10% vid 140°C.

8.5. Färgmätning.

8.5.1. Experimentella resultat.

På köttbullar, som friterats 1, 3, 5 och 7 min i 110, 130, 150 och 170°C, utfördes färgmätning med apparatur av märket ELREPHO. Ljusreflexionen mätes i denna apparat genom tre olika färgfilter. Sålunda erhålles för varje prov som mätes, tre värden R_x , R_y och R_z , som varierar mellan 0 och 100%. Dessa kan omräknas till standardiserade koordinater x , y och z genom följande formler:

$$\left. \begin{aligned} x &= (0.8 \cdot R_x + 0.2 \cdot R_z) / S \\ y &= R_y / S \\ z &= R_z / S \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

där $S = 0.8 \cdot R_x + R_y + 1.2 \cdot R_z$

Följande tabell visar mätresultat från köttbullar som fri-
terats i nytt fett och mätts inom ett par timmar.

Tabell 7: $\left. \begin{matrix} R_x \\ R_y \\ R_z \end{matrix} \right\}$ - värden för friterade köttbullar (%):

Fettemp Stek- tid	110°C	130°C	150°C	170°C
1 min	23.95 19.10 12.70	27.50 22.95 14.05	24.00 19.60 10.85	23.15 18.95 10.00
3 min	25.95 21.50 13.75	21.75 17.75 9.75	21.10 16.00 6.90	14.10 9.20 3.70
5 min	23.40 18.65 11.05	20.85 16.90 8.80	16.05 10.65 4.00	11.80 7.70 3.50
7 min	31.00 26.70 16.40	21.60 14.75 6.05	14.15 9.30 3.95	8.30 5.50 2.95

I

II

$\left. \begin{matrix} R_x \\ R_y \\ R_z \end{matrix} \right\}$ - värden för rå köttbulle:

30.40	29.15
25.30	24.10
16.40	15.85

Sedan dessa grundvärden omräknats till x och y-värden erhöles:

Tabell 8: $\left. \begin{matrix} x \\ y \end{matrix} \right\}$ - data

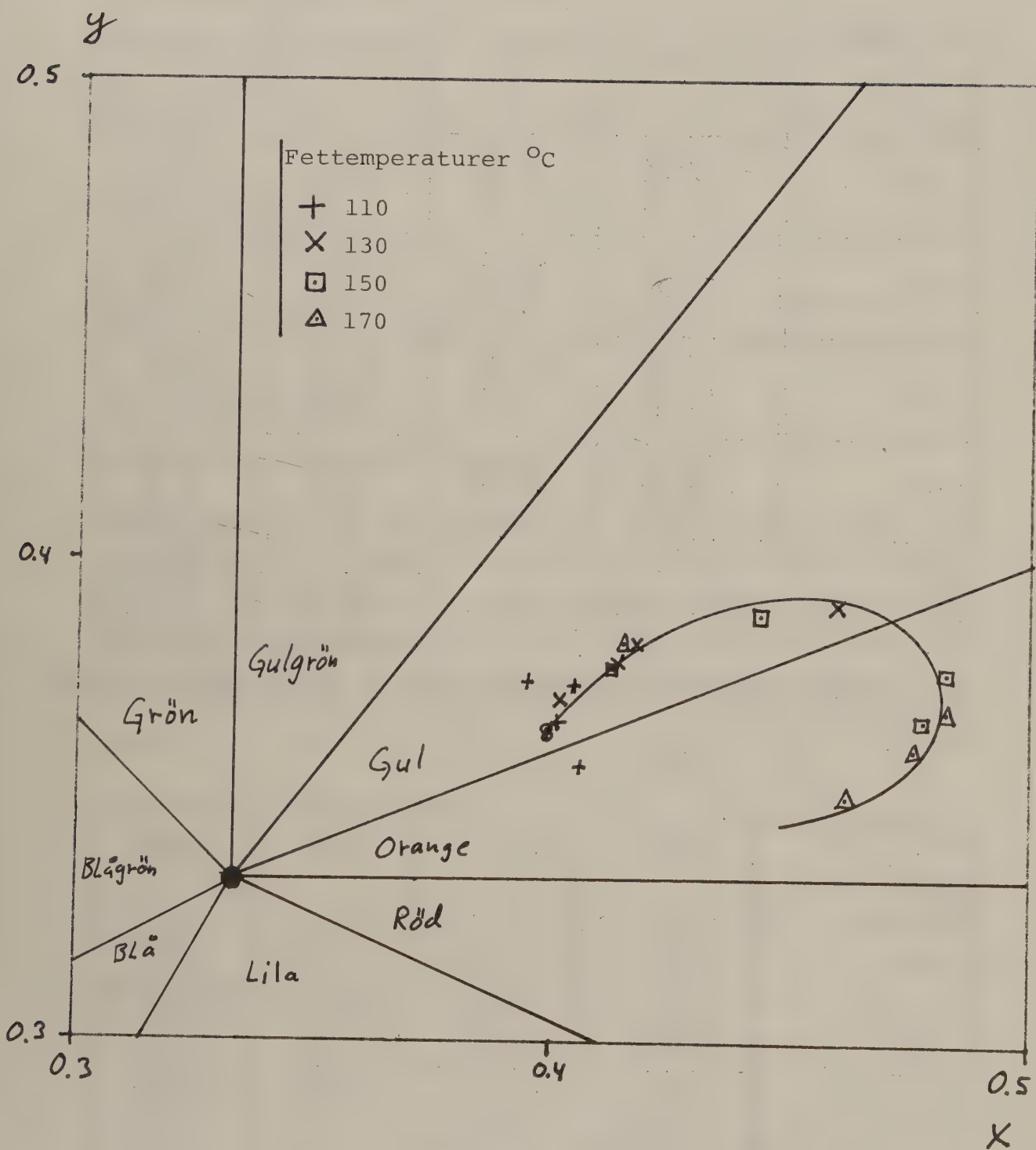
Fettemp Stek- tid	110°C	130°C	150°C	170°C
1 min	0.405 0.357	0.401 0.371	0.412 0.378	0.414 0.383
3 min	0.400 0.366	0.413 0.379	0.443 0.389	0.482 0.369
5 min	0.404 0.374	0.417 0.383	0.482 0.377	0.475 0.361
7 min	0.394 0.375	0.459 0.391	0.477 0.367	0.461 0.351

I

II

$\left. \begin{matrix} x \\ y \end{matrix} \right\}$ - data för rå köttbulle:

0.398	0.398
0.365	0.363



Figur 23.

I koordinatsystemet (x, y) kan man återfinna alla färger, i sektorer med spetsen i vitpunkten $(0.333, 0.333)$. Ju längre ut i sektorn man rör sig desto mer mättad blir färgen. På föregående sida har (x, y) -data plottats. Som man kan se ligger punkterna inom sektorerna gul och orange, d v s bruna färger. Ju högre temperatur och ju längre friteringstid desto större färgmättnad (brunare) och desto mer dragning från gulbrunt till rödbrunt. Det allra intressantaste är att alla punkter ligger på en och samma färgförändringskurva. Det betyder att man kan uppnå samma färg genom öka stektiden vid en lägre temperatur. D v s det är bara en typ av färgförändringsreaktion som sker.

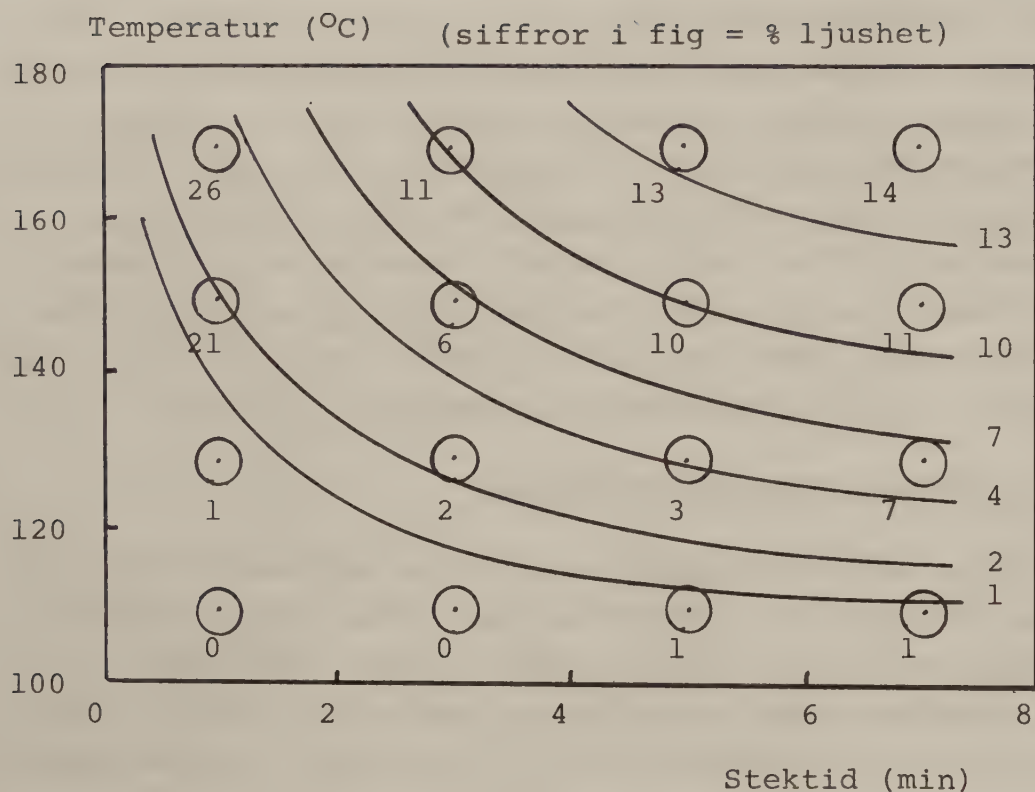
8.5.2. Färgförändringsparametrar.

Ett dåligt mått på färgförändringen är avståndet från vitpunkten eftersom det ökar först men avtar igen vid ökande tid-temperatur. Som lämpligt mått kan man förslagsvis använda avståndet mätt utmed kurvan med början vid rå fårs. Låt oss kalla detta mått för f . Vi erhåller följande tabell:

Tabell 9: Färgförändringen f .

Fettemp Stek- tid	110°C	130°C	150°C	170°C
1 min	0.000	0.008	0.021	0.026
3 min	0.004	0.024	0.056	0.107
5 min	0.013	0.029	0.101	0.125
7 min	0.005	0.071	0.112	0.139

I figur 24 har f inlagts som funktion av tid och temperatur. Ett försök har också gjorts, att med en kurvskara visa hur f varierar. Det kan sägas representera en subjektiv regressionsanalys utan modell.

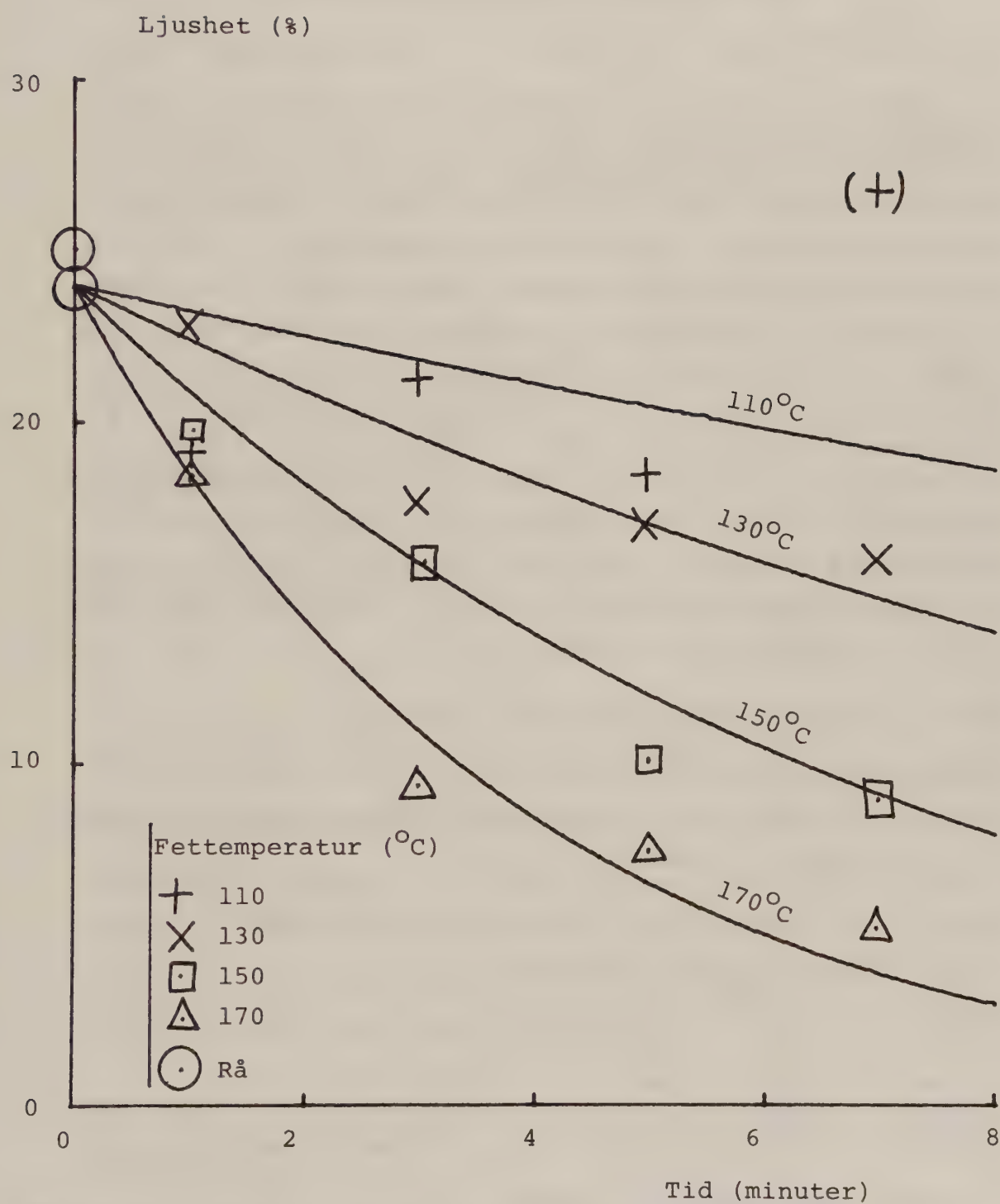


Figur 24.

Ett annat mått på färgförändringen, som är betydligt enklare att använda, utan att vara sämre, är ljusheten, L . Den definieras helt enkelt som $L = R_y$ eftersom det filter som mäter R_y släpper igenom synbarligen vitt ljus. Ljusheten ligger således mellan 0 och 100%. I diagrammet på nästa sida har L avsatts som funktion av tiden för de fyra temperaturerna. De fyra kurvorna motsvarar en multipelregressionsanalys, som har utförts under antagande att förändringen av L följer en första ordningens reaktion. Resultterande formel blev:

$$\left. \begin{aligned} L &= 24 \cdot e^{-k_L \cdot \tau} \\ k_L &= 3300 \cdot e^{-\frac{6000}{t_{\infty} + 273}} \text{ där} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

τ är stektid (sek) och t_{∞} är fettemperatur ($^{\circ}\text{C}$).



Figur 25.

Den andra formeln är Arrhenius ekvation där talet 6000 multiplicerat med allmänna gaskonstanten = 8.314 J/mol, °C utgör aktiveringsenergin E_a för färgförändringsreaktionen. Sålunda erhålles:

$$E_a = 50 \left[\text{kJ/mol} \right] \quad (10)$$

Dagerskog /7/ erhöill värdet 60 kJ/mol. Dessa värden är refererade till fettemperaturen, men om yttemperaturen i stället används erhålles ett större värde. Yttemperaturen är dessvärre okänd. Reaktionen är förmodligen en Maillard-reaktion, vars aktiveringsenergi ligger mellan 100 och 200 kJ/mol /7/. Formeln för ljusheten L är avsedd att användas i en datormodell, men ekv 9 gäller bara för köttbullar med diametern 32 mm. Samma ljushetsekvation bör i datormodellen kunna användas för både för biffar och köttbullar av olika storlek samt för olika stekmetoder. Emellertid har ännu inte yttemperaturer kunnat mätas noggrannt i synnerhet inte under fritering. Därför valdes att i datormodellen använda ekvation 9 med empiriska korrekationer, erhållna från försök.

8.5.3. Ljushet vid fritering av köttbullar.

Köttbullar av tre olika storlekar friterades vid 150°C tills alla nådde samma färg (L=16%). Medelvärden av trippelprov redovisas i tabell 10.

Tabell 10. Stektid till konstant färg (bullar).

radie	tid
8 mm	150 $\pm$ 3 sek
16 mm	180 $\pm$ 2 sek
32 mm	210 $\pm$ 2 sek

Ur denna tabell härleds formeln:

$$\tau_R = \tau + 100 \cdot 10^{\log \left(\frac{R}{0.016} \right)} \quad (11)$$

där τ_R är tiden för att steka en köttbulle med radien R

till samma ljushet, som en bulle med radien 16 mm erhåller på tiden τ . Formeln gäller för radier mellan 8 mm och 32 mm, men några andra radier för köttbullar är inte praktiskt brukliga.

8.5.4. Ljushet vid fritering av pannbiffar.

Biffar med diametern 10 cm friterades, såsom i föregående försök. Tre tjocklekar användes. Som referens användes köttbullar med diametern 16 mm som friterats i 180 sekunder. Medelvärden av dubberprov redovisas i tabell 11. Fettemp = 150°C.

Tabell 11. Stektid till konstant färg (biffar).

tjocklek	tid
8 mm	165 $\pm$ 3 sek
16 mm	180 $\pm$ 3 sek
32 mm	195 $\pm$ 3 sek

Ur tabellen härleddes formel 12:

$$\tau_R = \tau + 50 \cdot 10^{\log \left(\frac{R}{0.016} \right)} \quad (12)$$

där R i detta fall är biffens tjocklek.

8.5.5. Empirisk ljushetsformel.

Ifall ekvationerna 9, 11 och 12 föres samman i ett enda uttryck fås enligt bilaga 4:

$$L = 24 \cdot \exp(-k_L \cdot \tau \cdot (1 + 0.277 \cdot (g+1) \cdot 10^{\log(R/0.016)}))$$

där $k_L = 3300 \cdot \exp(-6000/(t_\infty + 273))$ (13)

Denna formel användes tills vidare i det datorprogram /1/ som beskrives senare.

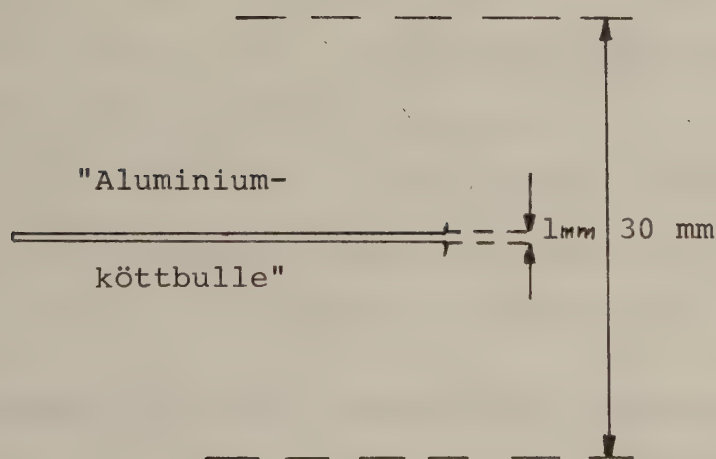
8.6. Mätning av värmeöverföringstal vid fritering.

Värmeöverföringstalet, som är av central betydelse för stekning är en funktion av det värmande mediets tillstånd (t ex temperatur, värmeledningstal, hastighet) och produktens ytstruktur.

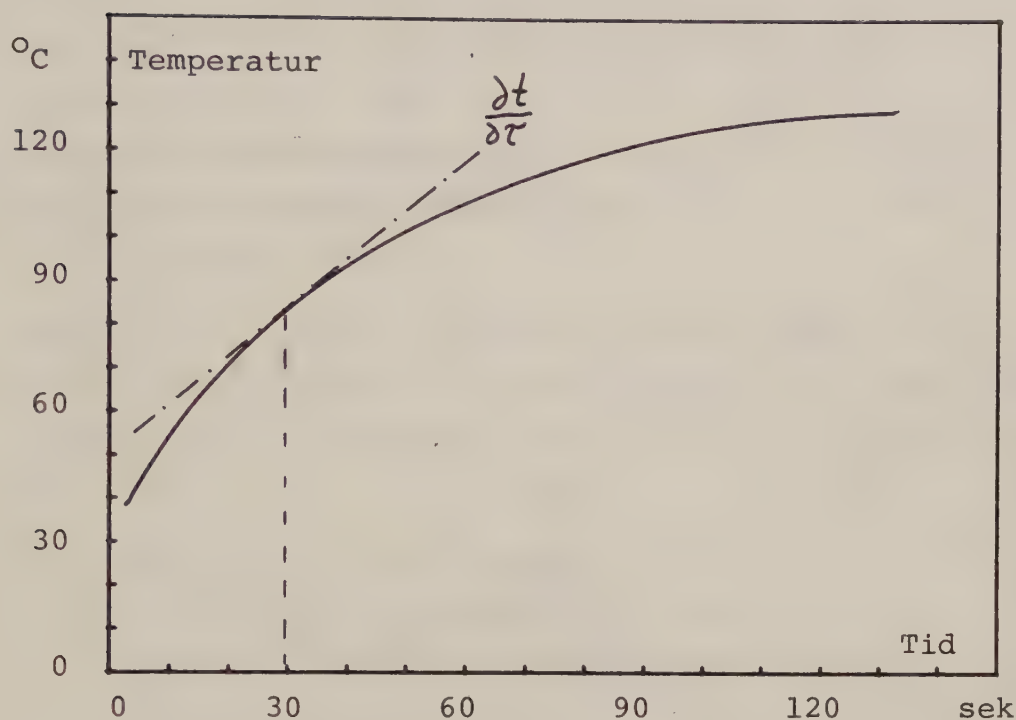
Det betyder att värmeöverföringstalet har all anledning att ändras under stekningens gång. I synnerhet vid fritering då frityrfettet i början strömmar mycket långsamt intill produkten. Men då ångavgången sätter in sker en kraftig omblandning med ökad värmeöverföring. Det är mycket svårt att i modellförsök simulera värmeövergång under vatten-avkokning. Men den första friteringsfasen kunde lätt simuleras i följande försök.

8.6.1. Modellbulle.

En "aluminiumköttbulle" tillverkades. Dess diameter var 30 mm. Ytstrukturen var grov, som hos en riktig köttbulle. Strukturen hos ytan torde dock inte ha någon större inverkan på värmeöverföringstalet eftersom strömningen vid egenkonvektion ligger i det laminära området. Ett hål ($\varnothing=1$ mm) var borrarat från ena sidan till ca 1 mm från motstående yta. I hålet var ett termoelement av typ cromel-alumel placerat. Modellbullen tempererades i 25°C varefter fritering i 150 sek utfördes. Temperaturen i "bullen" registrerades med datalogger. En typisk temperaturkurva är ritad i figur 27.



Figur 26.



Figur 27.

8.6.2. Beräkning av värmeöverföringstal.

En värmebalans göres under antagande att aluminiumbullen hela tiden saknar temperaturgradienter:

$$q = \alpha \cdot \pi \cdot D^2 \cdot (t_{\infty} - t_R) = \frac{dt_R}{d\tau} \cdot m \cdot c_p$$

där q är överförd värmeeffekt

α är värmeöverföringstalet

D är bullens diameter (=30 mm)

t_{∞} är fett-temperaturen

t_R är yttemperaturen

τ är tiden

m är "bullens" massa (=36.5 g)

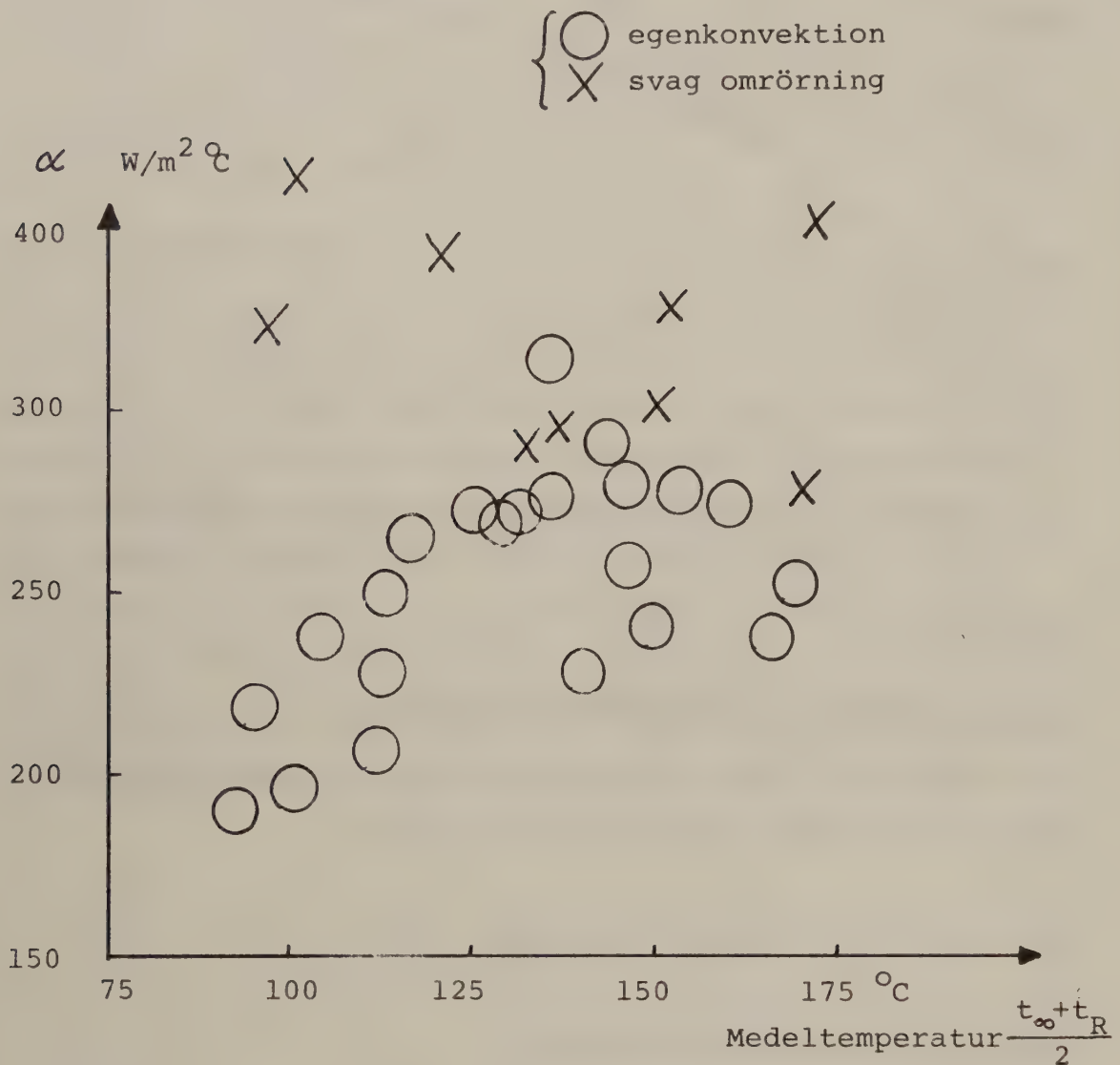
c_p är värmekapaciteten (=900 J/kg °C)

Efter insättning erhålles:

$$\alpha = 12000 \cdot \frac{\left(\frac{dt_R}{d\tau}\right)}{(t_{\infty} - t_R)} \quad (14)$$

Formeln ovan gäller vid temp = $\frac{t_{\infty} + t_R}{2}$

Ur temperaturkurvorna beräknades α enligt ekv 14 för tre tider per kurva. Resultatet är uppritat i figur 28.



Figur 28.

Man kan av experimenten dra den slutsatsen att värmeöverföringstalet innan en köttbulle börjat koka ligger vid $250\text{--}300 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$. Detta värde stämmer också väl överens med de datasimuleringar, som diskuteras senare i denna rapport.

9. Teoretiska aspekter på värmetransporten.

Vid jämförelse av resultat från modellsimulering och från experiment är det flera variabler som bör överensstämma samtidigt: centrumtemperatur, yttemperatur, vattenförlust och ljushet. Den för modellutvecklingen viktigaste variabeln är centrumtemperaturen.

Som vi såg i figur 6 behöver vi införa någon mekanism i modellen som tillåter att omgivningstemperaturen påverkar centrumtemperaturen. Detta kan ske på fyra principiellt olika sätt:

- a) Värmestrålning genom köttfärsen.
- b) Ångtransport och kondensation längre in.
- c) Skenbar värmeledning genom termodiffussion.
- d) Olika mekanismer som bidrar till att kokpunktsisotermen förflyttas snabbare inåt.

Den sista punkten kan omfatta följande mekanismer:

- d1) Kokpunktsförhöjning i kokzonen.
- d2) Stor restvattenhalt i stekskorpan.
- d3) Värmeöverföringstalet varierar starkt under stekningen.

Dessa mekanismer skall diskuteras i detta kapitel med hänsyn till utförda experiment, teoretiska undersökningar och datorsimuleringar.

9.1. Värmestrålning i köttfärsen.

Denna mekanism medtas bara för fullständighetens skull. Köttfärsen är delvis genomskinlig för synligt ljus. Men vid de våglängder som utsänds vid frityrfettetemperatur är genomsläppligheten mindre /7/. Dessutom är strålningseffekten mycket ringa i det aktuella temperaturområdet. Något bidrag till värmetransporten kan därför inte komma från värme-strålningen.

9.2. Ångtransport i långa porer.

Det är närliggande att anta att vattenånga som bildas vid ytan kan strömma inåt i en lång por för att avge sitt kondensationsvärme längre in. Emellertid talar tre olika experiment emot att detta skulle förekomma:

- i) Enligt resultat på sidan 18 förekommer det ingen signifikant stegring av vattenhalten i de centrala delarna av en köttbulle under fritering.
- ii) Enligt myrsyraförsöken (8.1.3.) kan man inte påvisa någon ångtransport i köttbullen.
- iii) Fotografier (sid 29) visar att inga långa eller korta sammanbundna porer förekommer.

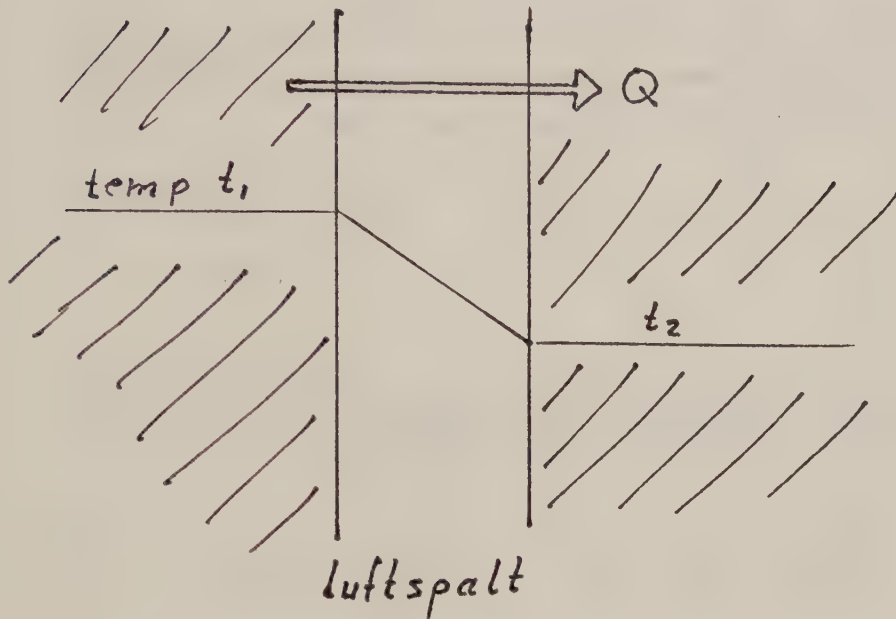
9.3. Ekvivalent värmeledningsförmåga /8, 9, 10, 11/

Termodiffussion /9, 11, 12, 13, 14/ innebär att mass-transport åstadkommes p g a en temperaturgradient.

Det är alltså denna effekt som åstadkommer att en fuktighetsfördelning så småningom inställer sig i ett map tiden konstant temperaturfält!

Denna mekanism kräver att materialet är poröst. Men porerna kan i princip vara slutna och hur små som helst som följande härledning visar.

Fritt efter Krischer m.fl. /9,11/



Figur 29.

Redan 1889 visade Stefan att

$$G = \frac{k \cdot P_O}{R_D \cdot T \cdot \delta} \cdot \ln \frac{P_O - P_{D2}}{P_O - P_{D1}} \quad (16)$$

d v s nettomängden ånga G som diffunderar genom ett luftskikt av tjockleken δ vid viss absolut temperatur T och visst lufttryck P_O . Partialtrycket för ångan (mättad!) är P_D , gaskonstanten är R_D och diffusionstalet är k . Loguttrycket kan förenklas om δ är litet d v s

$$P_{D1} \approx P_{D2} \quad (t_1 \approx t_2)$$

$$\ln \frac{P_O - P_{D2}}{P_O - P_{D1}} = \ln \left(1 + \frac{P_{D1} - P_{D2}}{P_O - P_{D1}} \right) \approx \frac{\Delta P_D}{P_O - P_D} \quad \text{dvs}$$

$$G = \frac{k}{R_D T} \cdot \frac{P_O}{P_O - P_D} \cdot \frac{\Delta P_D}{\delta} \quad (17)$$

Värmeflödet Q ges bidrag både av värmeledningen i luften och av kondensationsvärmets från den ånga som diffunderade från den varmare till den kallare ytan. Dvs

$$Q = Q_L + Q_D \quad (18)$$

Definition av ekv. värmeledningsförmåga λ' :

$$Q = \lambda' \cdot \frac{t_1 - t_2}{\delta} \quad (19)$$

vilket är Ficks lag liksom nästa ekv.:

$$Q_L = \lambda_L \cdot \frac{t_1 - t_2}{\delta} \quad (20)$$

Diffussionsvärmets är:

$$Q_D = G \cdot r \quad (21)$$

där r är ångbildningsvärmets. Av ekvationerna 18, 19, 20 och 21 erhålles:

$$\lambda' = \lambda_L + \frac{G \cdot r \cdot \delta}{t_1 - t_2} \quad (22)$$

som om G elimineras ger:

$$\lambda' = \lambda_L + \frac{k \cdot r}{R_D \cdot T} \cdot \frac{P_O}{P_O - P_D} \cdot \frac{\Delta P_D}{t_1 - t_2} \quad \text{eller}$$

$$\lambda' = \lambda_L + \frac{k \cdot r}{R_D \cdot T} \cdot \frac{P_O}{P_O - P_D} \cdot \frac{dP_D}{dt} \quad \dots (23)$$

Vid beräkning av λ' kan följande ekvationer användas om SI-systemet tillämpas:

$$T = 273 + t \quad [^{\circ}\text{K}] \quad (t \text{ i } ^{\circ}\text{C})$$

$$P_O = 101\,300 \quad [\text{N/m}^2] \quad (\text{dvs } 760 \text{ mm Hg})$$

$$P_D = 10^5 \cdot \exp \left(12 - \frac{4028}{(t + 236)} \right) \quad [\text{N/m}^2] \quad /15/$$

$$\frac{dP_D}{dt} = P_D \cdot \frac{4028}{(t + 236)^2} \quad [\text{N/m}^2, ^{\circ}\text{C}] \quad /15/$$

$$k = \frac{2.39}{P_O} \cdot \left(\frac{T}{273} \right)^{2.3} \quad [\text{m}^2/\text{s}]$$

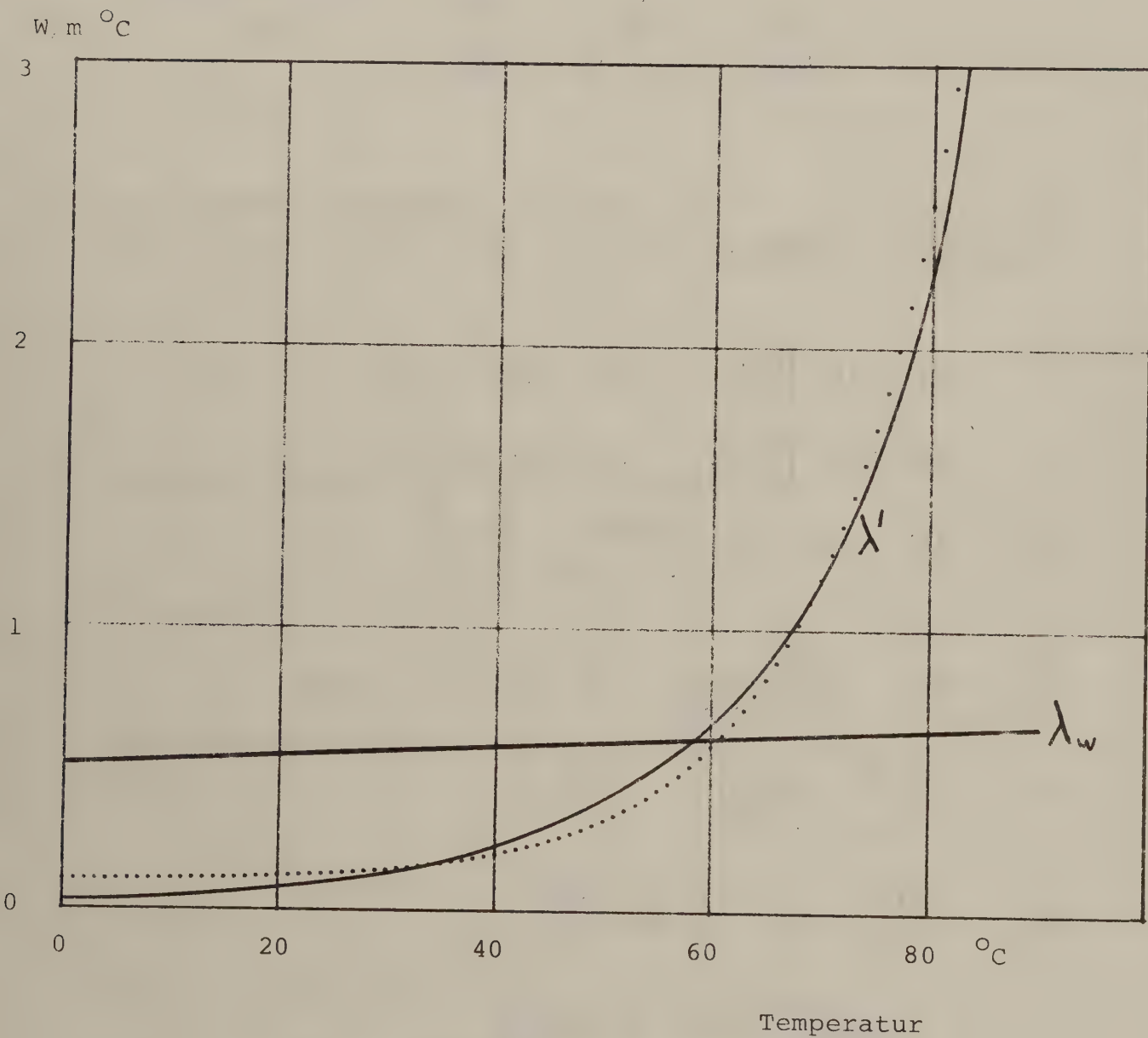
$$R_D = \frac{8314}{18} = 462 \quad [\text{J/kg}, ^{\circ}\text{K}]$$

$$r = 2500000 - 2440 \cdot t \quad [\text{J/kg}]$$

$$\lambda_L = 0.00194 \cdot \frac{(1 + 0.000194 \cdot T)}{(1 + 117/T)} \cdot \sqrt{T} \quad [\text{W/m}, ^{\circ}\text{C}]$$

$$\text{jfr även } \lambda_w = 0.520 \cdot (1 + 0.003 \cdot t) \quad [\text{W/m}, ^{\circ}\text{C}]$$

Värmeledningsförmågan hos en por med stillastående
fuktighetsmättad luft.



Figur 30.

Man kan se i föregående figur att en por, fylld med mättad luft, vid 58°C börjar leda värme lika bra som vatten.

Eftersom ekv 23 blir väl så invecklad sedan alla uttryck införts är det lämpligt att låta datorn räkna med en enklare formel. En anpassning av en enklare ekvation gjordes därför. Den nya formeln är prickad i figur 30 och lyder:

$$\lambda_{\text{por}} = 0.1 + 0.004 \cdot \exp(0.08 \cdot t) \quad (24)$$

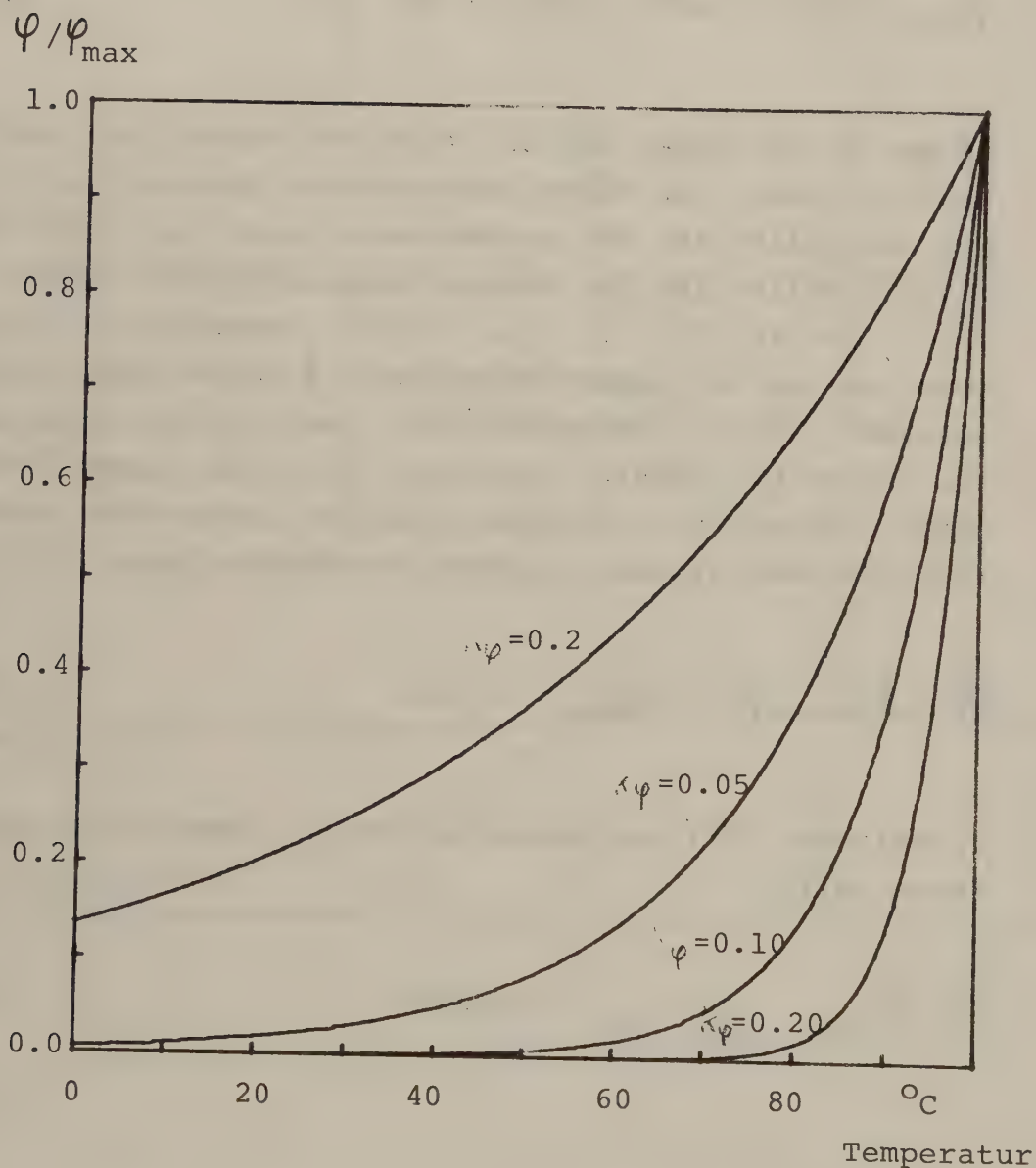
Då man nu har porer med ett värmeledningstal och köttfärs med ett annat, kan värmeledningstalen sammansättas till ett som gäller för det porösa materialet. Det finns många olika modeller för hur sådana sammansättningar göres /8, 9, 14, 16, 17, 18, 19/. Vid låg temperatur är porositeten så låg att sammansättningens λ -värde blir nästan detsamma som för icke-porös färs. Men vid hög temperatur har färsen det lägsta λ -värdet. En linjär sammansättningsmodell torde kunna användas eftersom osäkerheten ändå är relativt stor ifråga om porositetsfördelningen. D v s:

$$\lambda = \lambda_{\text{por}} \cdot \varphi + \lambda_{\text{färs}} \cdot (1 - \varphi) \quad (25)$$

Porositeten (φ) har antagits vara en funktion av temperaturen enligt:

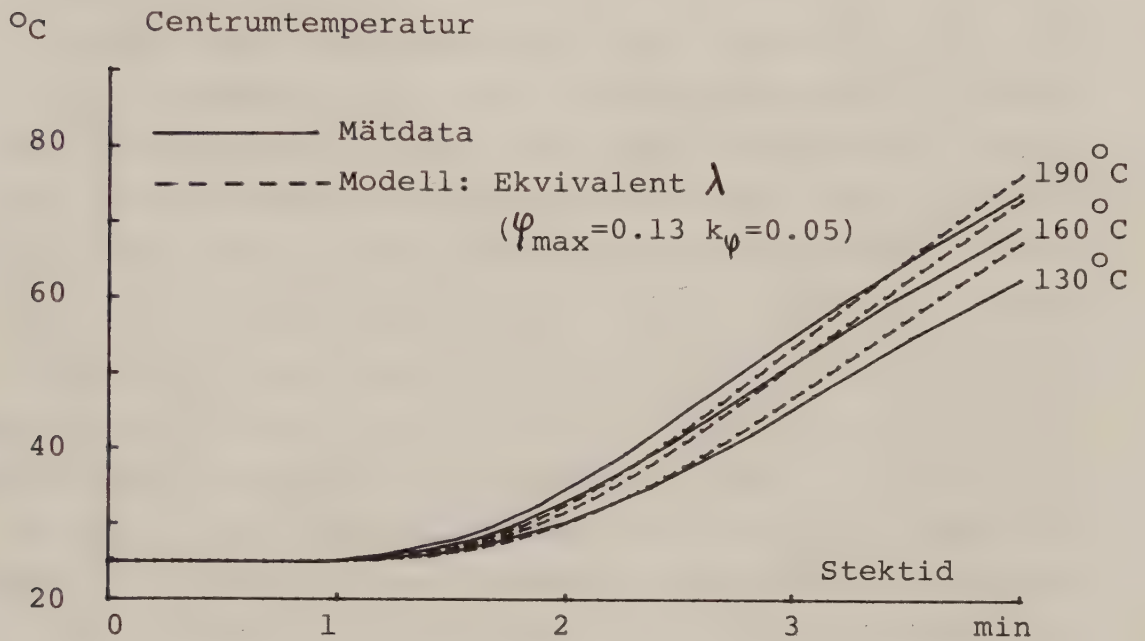
$$\varphi = \varphi_{\text{max}} \cdot \exp(k_{\varphi} \cdot (t - 100)) \quad (26)$$

Figur 31 visar sambandet vid olika värden på konstanten k_φ . Ekvation 26 är empirisk, men den återspeglar ändå en trolig fördelning. Det är närmast ytan, som porositeten är störst ($\varphi_{\max}$). Det visar snittbilder av samma typ som i figur 15, tagna efter längre tids fritering. Längre in där färsen nätt och jämt är koagulerad bör porositeten vara ungefär noll (0.1% enligt sid 33).

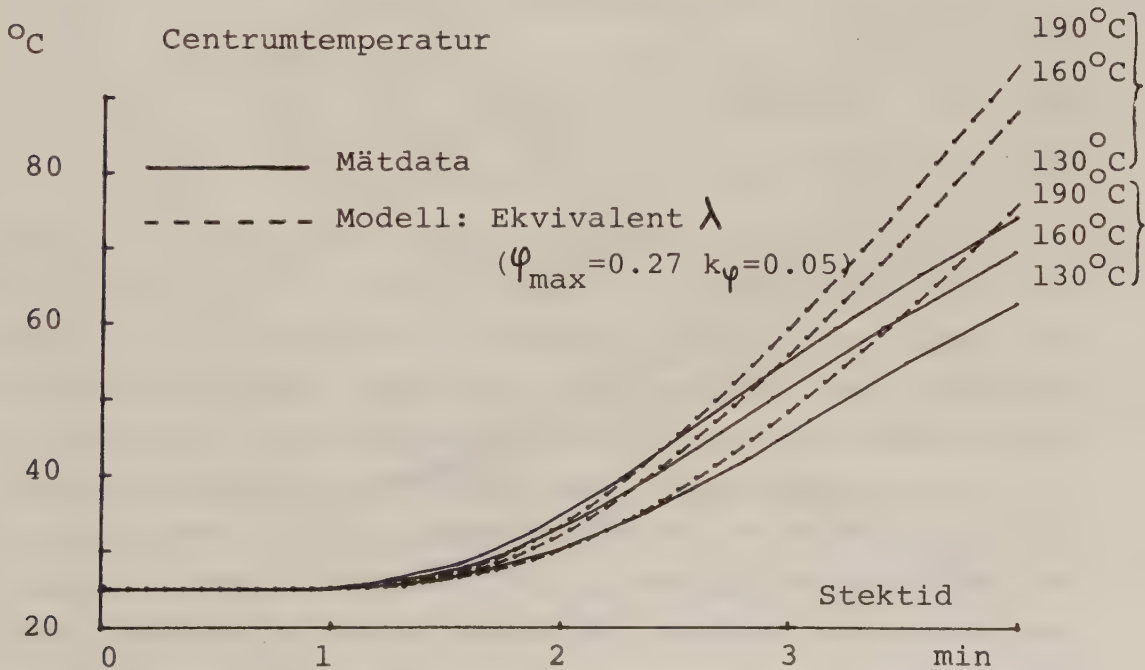


Figur 31.

Formlerna 24, 25 och 26 lades in i det tidigare omnämnda datorprogrammet. Simuleringar gjordes för olika $\varphi_{\max}$ och k_{φ} . Konstanten k_{φ} visade sig inte ha någon större principiell betydelse, utan värdet $k_{\varphi} = 0.05$ valdes. Vid två olika värden på $\varphi_{\max}$ erhölls typiska resultat enligt nedanstående två figurer.



Figur 32.



Figur 33.

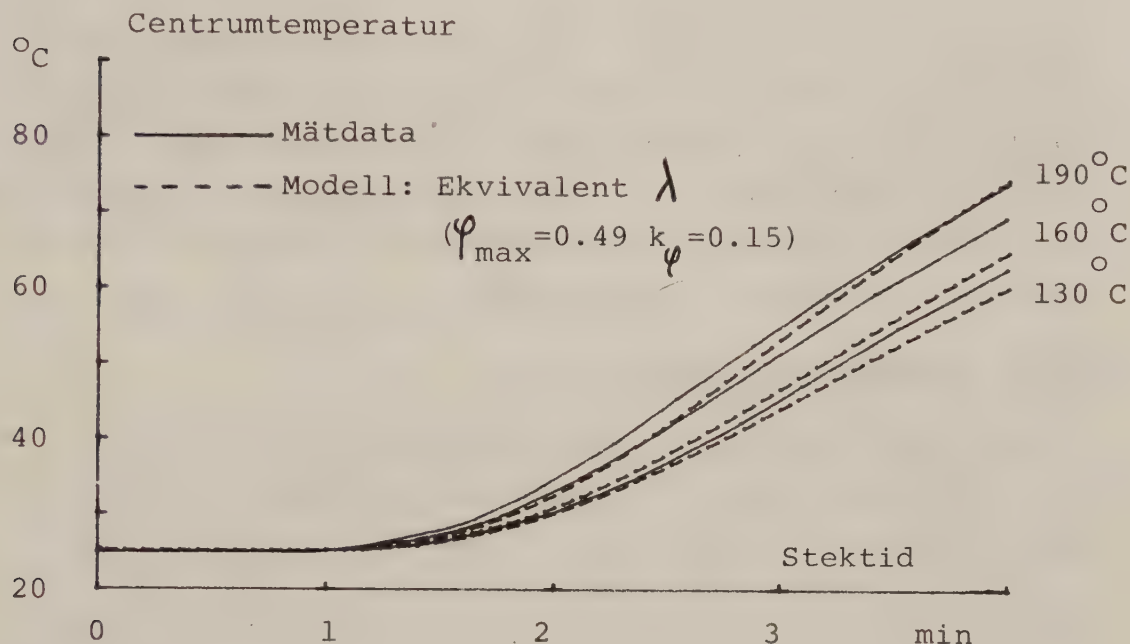
Enligt tabell 5 ligger porositeten vid 5-10% i genomsnitt, varför ekvation 26 integrerades enligt bilaga 3, varvid det visade sig att "5 och 10% i genomsnitt" motsvarade 13% respektive 27%, som användes i diagrammen 32 och 33. Det framgår av dessa diagram att önskad spridning av kurvorna för 130, 160 och 190°C fettbadstemperatur åstadkommes med denna modell. Men å andra sidan får kurvorna ett för brant förlopp mot slutet. Om modellen skulle korrigeras med ett lägre värmeledningstal för färsen, vilket i princip innebär en skalning av tidsaxeln, så kommer kurvorna att ligga för lågt vid ca 2 min. Det betyder att hela kurvformen är felaktig. Modellen med ekvivalent värmeledning verkar därför inte trolig. Detta kan synas märkvärdigt när köttbullen bevisligen har en medelporositet på 5-10% under stekning. Men formlerna för den ekvivalenta värmeledningsförmågan härleddes under förutsättning att jämvikt hann inställa sig. Det är närliggande att tro att så inte är fallet vid de relativt snabba stekförloppen. För att få en dynamisk jämförelse kan man se på två diffussiviteter: värmediffussiviteten, d_v s temperaturledningstalet och diffussiviteten av ånga i luft (s 55).

Tabell 12.

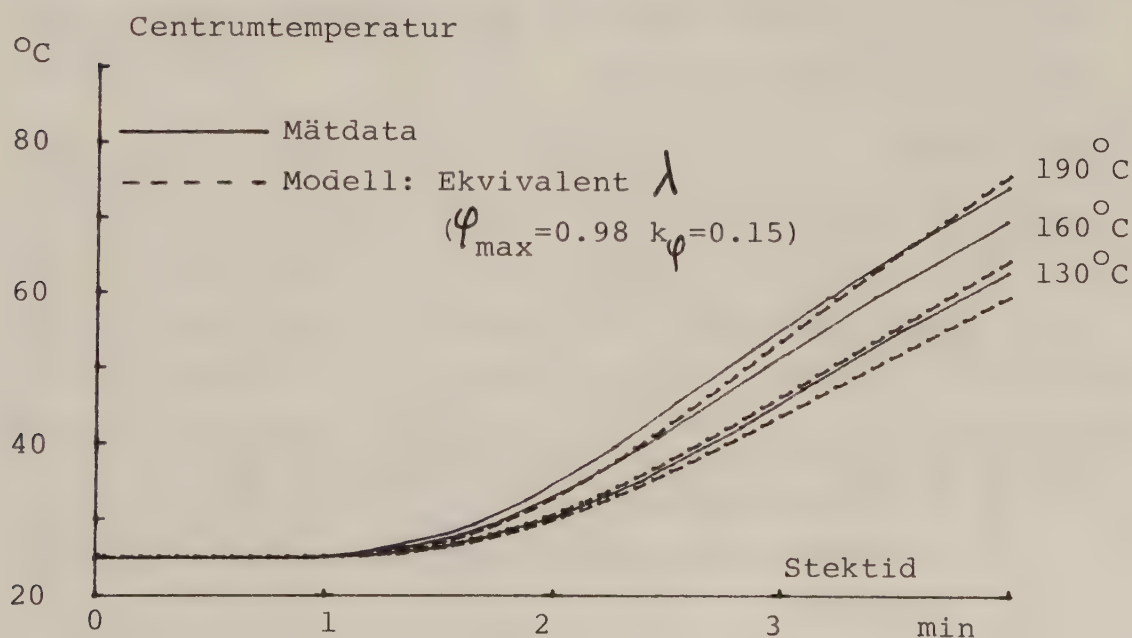
Diffussivitet	m^2/s
av värme i köttfärs	$0.14 \cdot 10^{-6}$
av ånga i luft	$24 \cdot 10^{-6}$

Enligt tabell 12 är diffussiviteten för ånga 170 gånger så stor som diffussiviteten för temperatur. Det innebär också att jämvikten för ångdiffussionen inställer sig 170 gånger snabbare. Det enda som då skulle kunna hämma ångdiffussionen är massöverföringstalet vid porväggen eller diffussiviteten av vatten i porväggen. Det senare är troligast eftersom diffussiviteten av vatten i köttfärs (se sid 25) är helt försumbar i förhållande till diffussiviteter i tabell 12. Det vatten som används för ångdiffusion är därför troligen sådant som pressas ur strukturen vid koaguleringen och mängden tillgängligt sådant vatten är mycket svårberäknat.

En annan möjlighet som bör simuleras är att alla porer ligger koncentrerade mycket nära kokpunktsisotermen. Det innebär att porositeten just där blir mycket stor. Om ekvation 26 integreras (som i bilaga 3), fast för $k_\varphi = 0.15$ erhålles för medelporositeten 5 och 10%, värden för $\varphi_{\max}$ på 49% respektive 98%. Simulering av detta fall visas i figurerna 34 och 35:



Figur 34.



Figur 35.

Det är inte stor skillnad mellan figur 34 och 35, vilket tyder på porositeten, eller egentligen den ekvivalenta värmeledningsförmågan, inte är den för centrumtemperaturen begränsande faktorn när den verkar i huvudsak bara i ett område intill kokpunktsisotermen. Det är mer intressant att se på skillnaden mellan figur 32 och 34. Enligt experiment är det något större skillnad mellan 130°C- och 160°C-kurvorna än mellan 160°C- och 190°C-kurvorna. Samma sak gäller för modellen i figur 32, men omvändningen gäller för modellen i figur 34. Det talar mot att porerna skulle vara koncentrerade vid 100°C-fronten. Men å andra sidan är kurvformen mer i överensstämmelse med experimenten. En vidare diskussion om mekanismen med ekvivalent värmeledning förekommer i kapitel 10.

9.4. Konvektion i porer.

I det sista fallet ovan har man alltså hög porositet i ett begränsat område. Det är då närliggande att anta att många porer är ganska stora - kanske flera (mm^3). Ju större en por är desto bättre blir förutsättningarna för egenkonvektion. Det finns många arbeten på egenkonvektion i hålrum av olika slag /t.ex. 13, 14, 20/.

Värmetransporten på grund av egenkonvektion uttryckes ofta som ett Nusselts tal:

$$\text{Nu} = f(\text{Ra}) \quad (27)$$

där Ra är Rayleighs tal

$$\text{Ra} = \frac{\beta \cdot g_0 \cdot \Delta T \cdot d^3}{a \cdot \nu} \quad (28)$$

där β är termisk volymsutvidgningskoefficient

g_0 är tyngdaccelerationen

ΔT är temperaturskillnad mellan motstående vertikala porväggar

d är diametern

a är temperaturledningstalet för porinnehållet

och ν är kinematiska viskositeten för porinnehållet.

Man har visat att om $Ra < 1000$ så sker inget konvektivt bidrag till värmetransporten. Genom att sätta in $Ra = 1000$ och adekvata värden på de övriga konstanterna erhålles den kritiska pordiametern då egenkonvektion precis börjar inverka på värmetransporten = 0.011 meter. D v s det behövs porstorlekar på ca 1 cm för att egenkonvektionen skall ha någon inverkan.

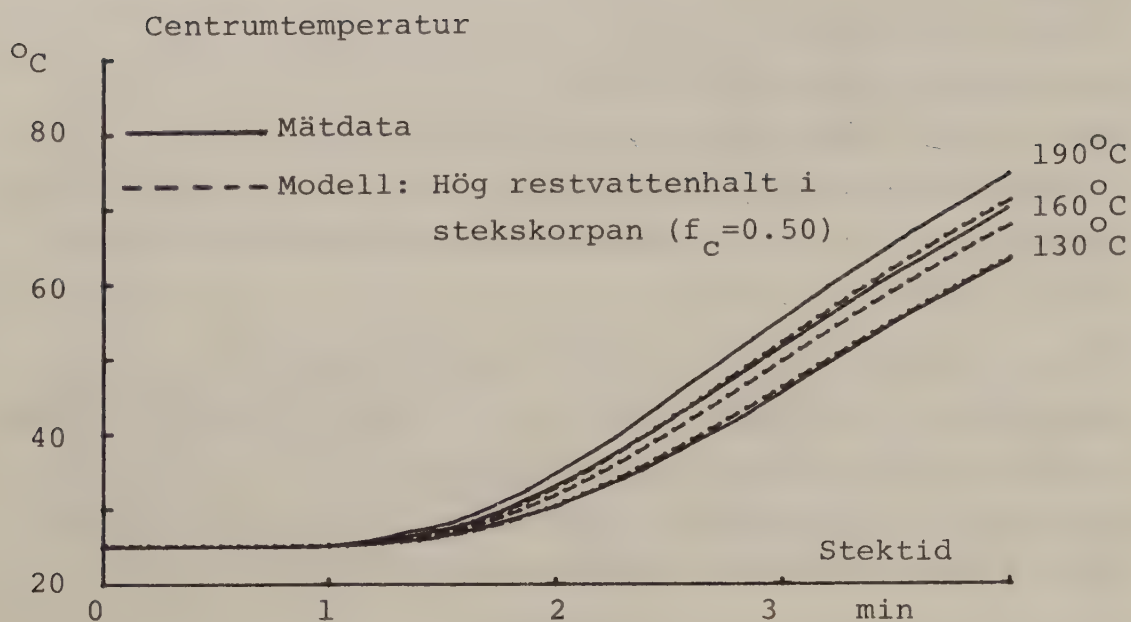
Det är däremot troligt att påtvingad konvektion i porer förekommer. Drivkraften kan vara den starka ångutvecklingen i förening med att kokpunktsisotermen rör sig varvid nya kanaler hela tiden öppnas och sluts. Simulering av detta bör i princip ge samma resultat som i figur 34 och 35.

9.5. Restvattenhalt i stekskorpan.

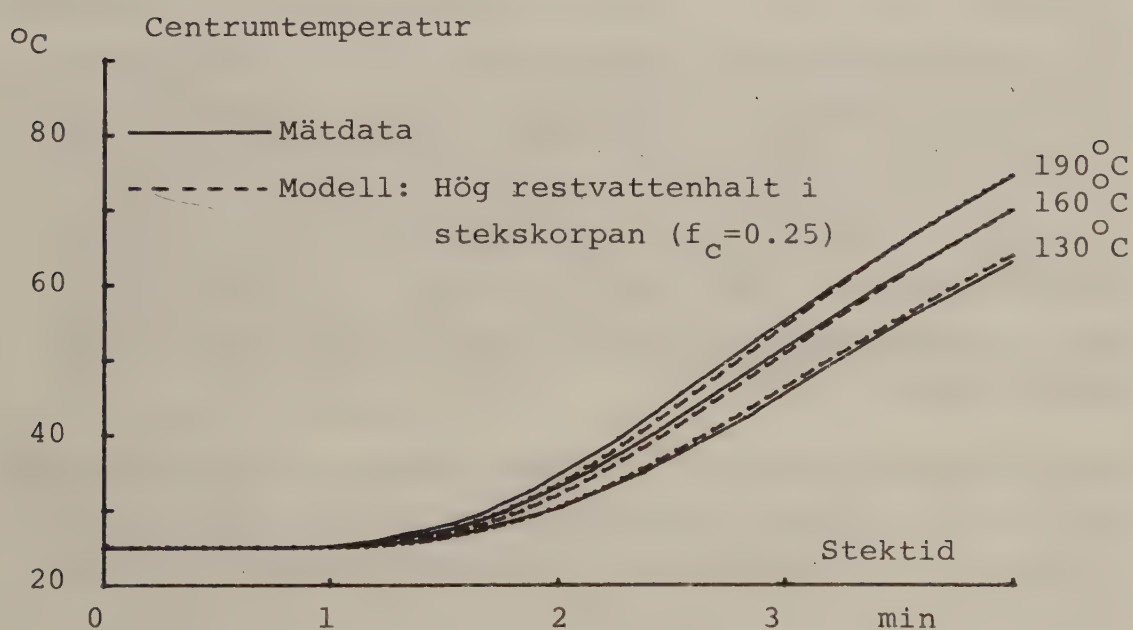
I kapitel 8.4. (sid 39) framtoogs experimentellt ett samband mellan medelvattenhalt i stekskorpan och yttemperaturen. En datorsimulering med ekvation 7 inlagd i programmet visade att jämfört med figur 6 (sid 14) höjdes 160°C -kurvan bara 0.5°C och 190°C 1°C vid 4 minuters fritering. Detta är visserligen positivt men otillräckligt för att förklara skillnaden mellan experiment och modell. Om inget annat sägs i fortsättningen ingår den nya formeln (ekv 7) vid simuleringarna.

Under stekning (som är ett snabbt förlopp i sorptionssammanhang) är det tänkbart att vattenhaltsjämvikt inte hinner inställa sig. Vattenhalten i stekskorpan skulle då vara högre än den enligt ekv 7 beräknade. Det betyder att vattnet egentligen överhettas. För att se hur detta antagande påverkar centrumtemperaturen göres två simuleringar, där för enkelhetens skull skillnaden mellan ursprungsvattenhalten och den beräknade medelvattenhalten reduceras genom multiplikation med konstanten f_c :

$$(\text{nytt } \bar{c}) = c_o - f_c \cdot (c_o - \bar{c}) \quad (29)$$



Figur 36.

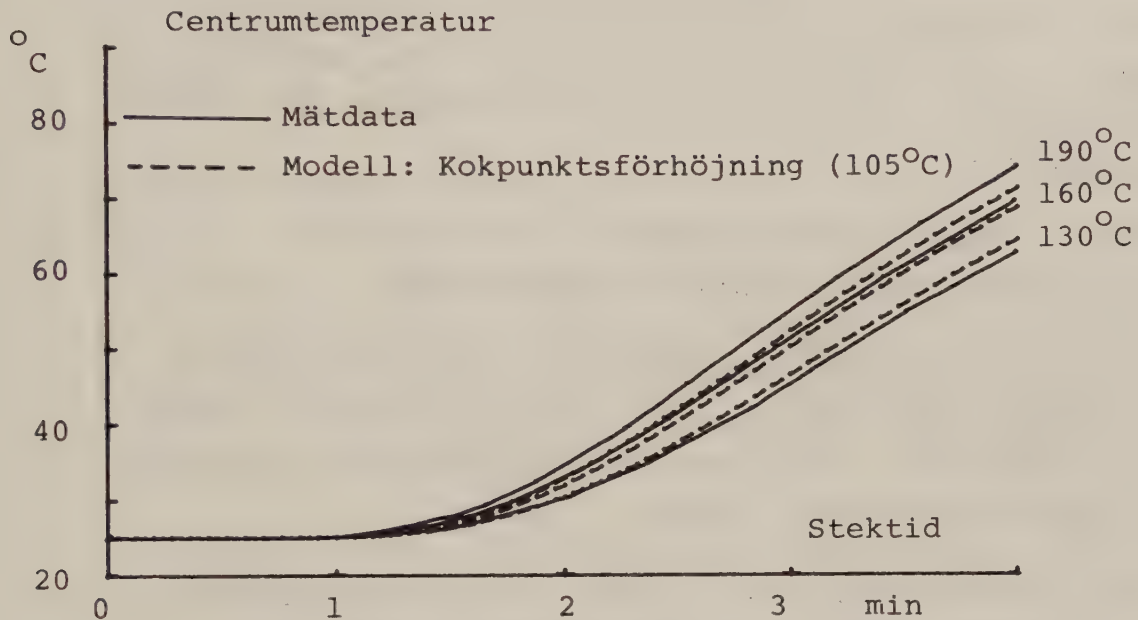


Figur 37.

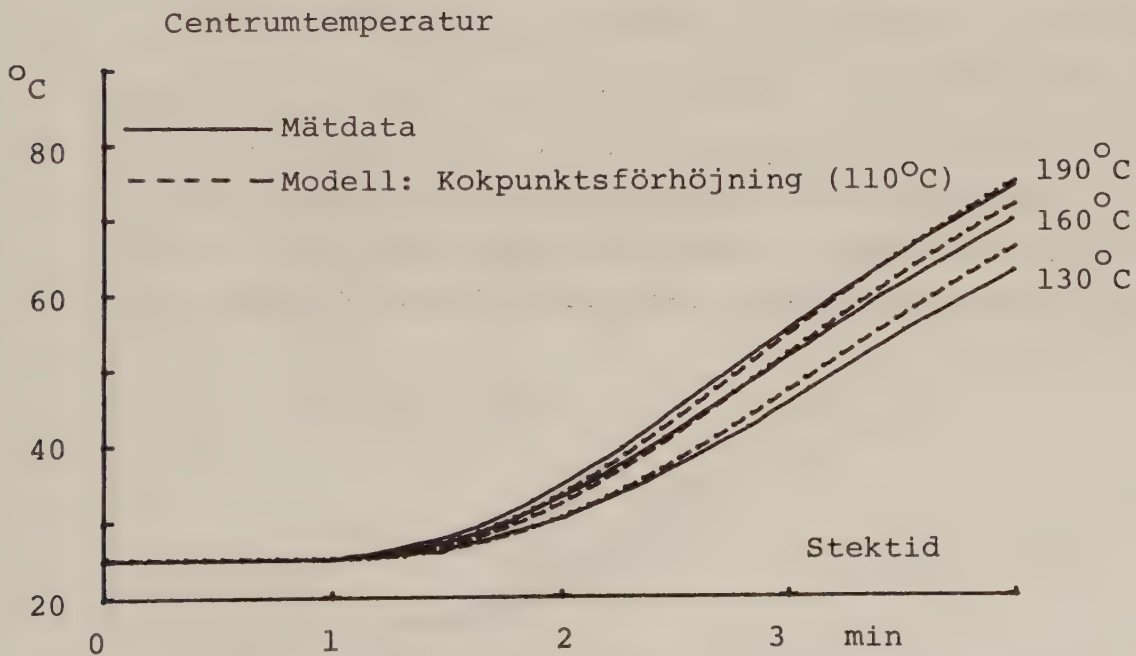
Som man kan se erhålles önskad spridning och höjning av kurvorna. Dessutom är kurvformen acceptabel. Detta tyder på att sådana mekanismer, som påverkar stekskorpans bildningshastighet är troliga. De har den fördelen, som vi skall visa i kapitel 10, att vattenförlusten behålles låg samtidigt som centrumtemperaturen har önskat förlopp.

9.6. Kokpunktsförhöjning.

Vi börjar med att antaga att kokpunkten för vattnet av någon anledning skulle kunna ligga över 100°C . Datorsimuleringar ger då följande resultat:



Figur 38.



Figur 39.

Man hade kanske väntat sig att denna mekanism skulle ge ungefär samma resultat som föregående ("Hög restvattenhalt") eftersom det i båda fallen är en slags överhettning. Men i detta senare fallet är drivkraften i början av stekningen större, eftersom yttemperatur går direkt upp till 105 respektive 110°C utan att bromsas upp vid 100°C.

Modellen med kokpunktsförhöjning ger inte tillräcklig spridning mellan kurvorna. Den är inte heller särskilt sannolik. Minst två tänkbara möjligheter finns för höjning av kokpunkten:

- a) koncentration av lösta ämnen.
- b) tryckhöjning p g a innesluten vattenånga.

Den första möjligheten vederlägges nästan av det faktum att kokpunkten bara skulle stiga knappt 1°C om man antog att allt salt (1%) i hela köttbullen skulle vara ansamlad i ett 2 mm tjockt skikt i ytan.

Den andra möjligheten är i så fall mer sannolik. Enligt figur 39 ligger 160°C- och 130°C-kurvan för högt, men i praktiken skulle kokpunktsförhöjningen vara mindre ju lägre oljebadstemperatur som föreligger. Därför skulle man kunna få en mycket bra anpassning med denna modell. Ändå verkar det otroligt att skorpan skulle kunna stå emot ett tryck, som i 110°C-fallet motsvarar nära 0.5 atö. Särskilt med tanke på alla de hål (porer) som finns i ytan. En beräkning av tryckhöjningen skulle kunna göras. Men då pordiametrarna är svåra att mäta, samtidigt som de påverkar övertrycket med 4:e-potensen, synes det meningslöst.

9.7. Värmeöverföringstalets inverkan.

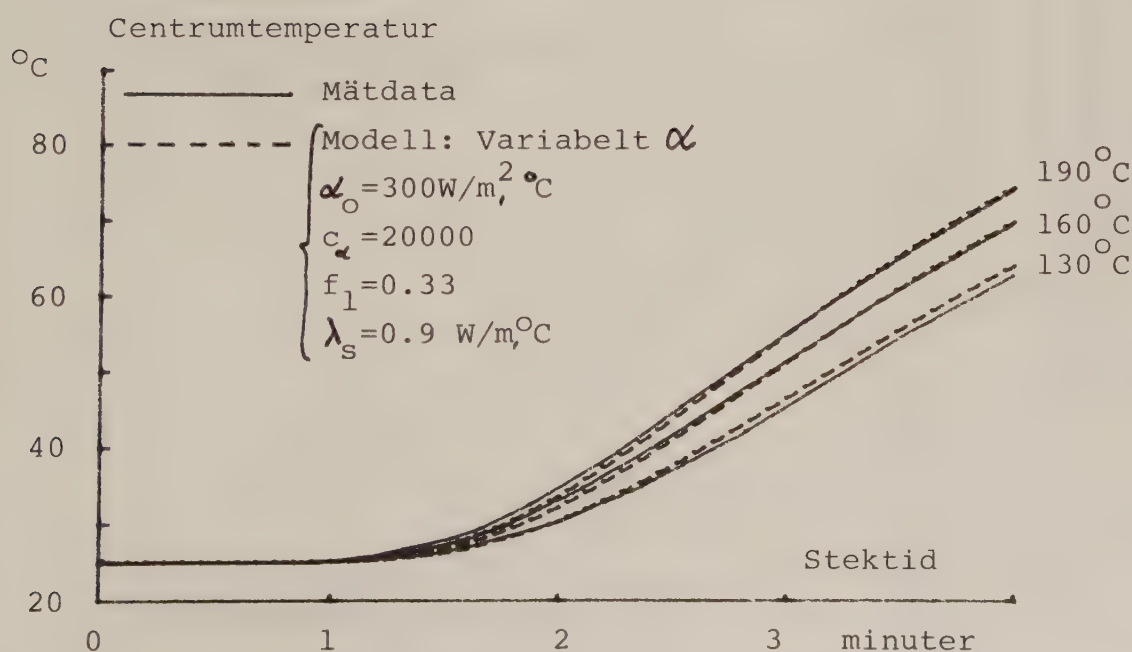
I alla visade simuleringar hittills har antagits att värmeöverföringstalet, α , är konstant lika med $300 \text{ W/m}^2, ^\circ\text{C}$.

Det är säkert en grov förenkling. Vid fritering bör α öka i samband med att produkten kommer i kokning, eftersom det då sker en kraftig omblandning i frityrfettet intill ytan. Följande formel har antagits:

$$\alpha = \alpha_0 + c_\alpha \cdot (w_{\text{out}})^{f_1} \quad (30)$$

vilket innebär att $\alpha = \alpha_0$ ($=300 \text{ W/m}^2, ^\circ\text{C}$ t.ex) då ångflödet $w_{\text{out}} = 0$, men beroende av ångflödet då kokning sker. Konstanterna c_α och f_1 får man fram genom simuleringar med ovanstående ekvation. Lämpligt värde på f_1 visade sig då ligga mellan 0.3 och 0.5. Då ökar också α med ångflödet snabbt vid små ångflöden, men långsammare vid höga ångflöden, vilket verkar naturligt.

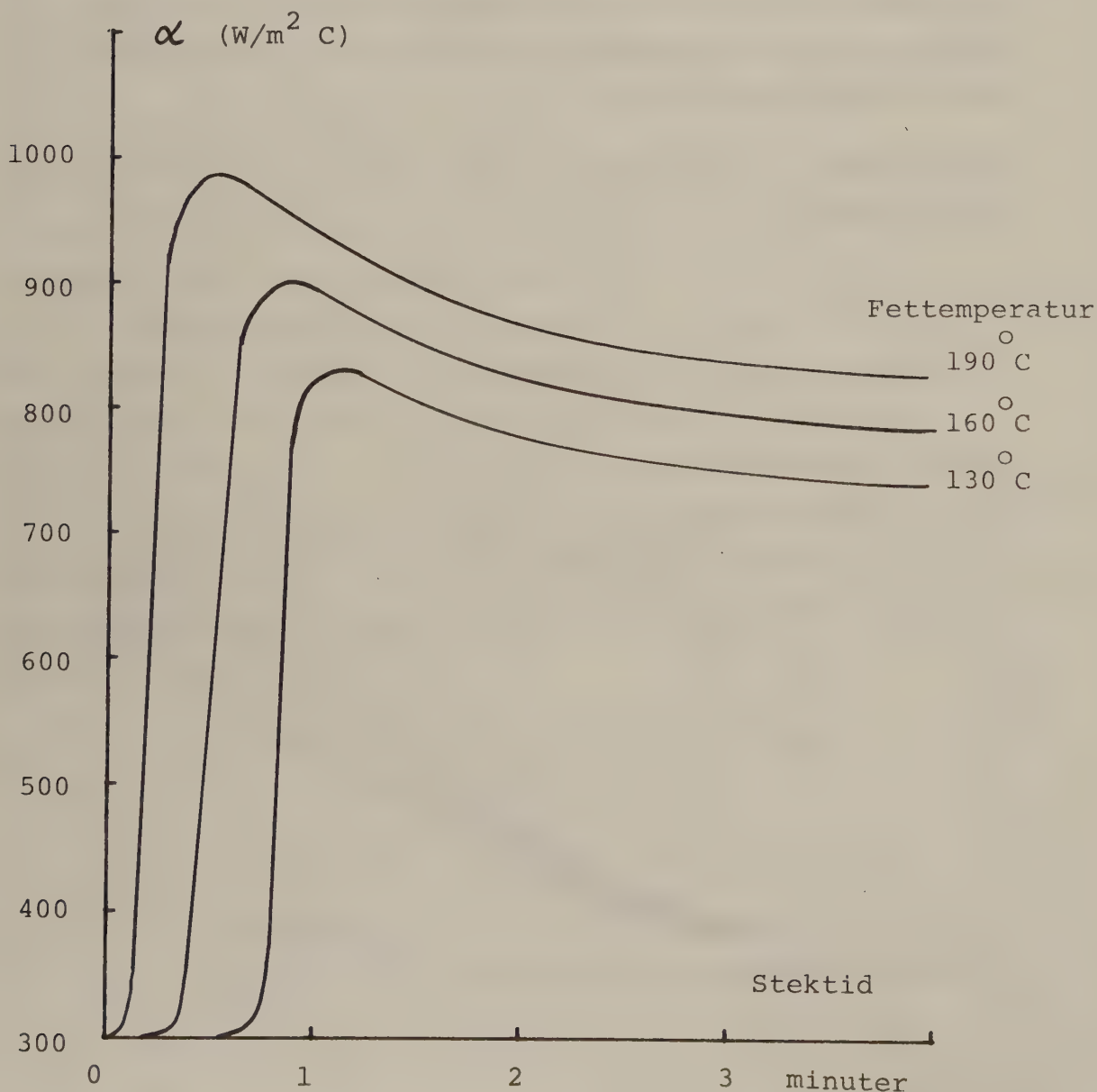
I nedanstående figur simuleras en stekning med ekvation 30 implementerad:



Figur 40.

En god överensstämmelse mellan modell och experiment tycks alltså kunna erhållas med hjälp av ekvation 30. Detta gäller särskilt centrumtemperaturkurvan. I kapitel 10 visas att vikts-förlustkurvan för denna modell kommer att ligga för högt i förhållande till experimentet, vilket beror på att stekskorpan tillväxer under avgivande av mycket mer vatten vid denna modell än vid modellen med hög restvattenhalt (kap 9.5). För övrigt bör jämförelse göras med simuleringarna i figur 37 och figur 40. Överensstämmelsen är som man kan se praktiskt taget fullständig.

Det är intressant att se på hur stora α -värdena blir med de i figur 40 ansatta konstanterna. Figur 41 visar hur α varierar i de tre fettemperaturfallen.



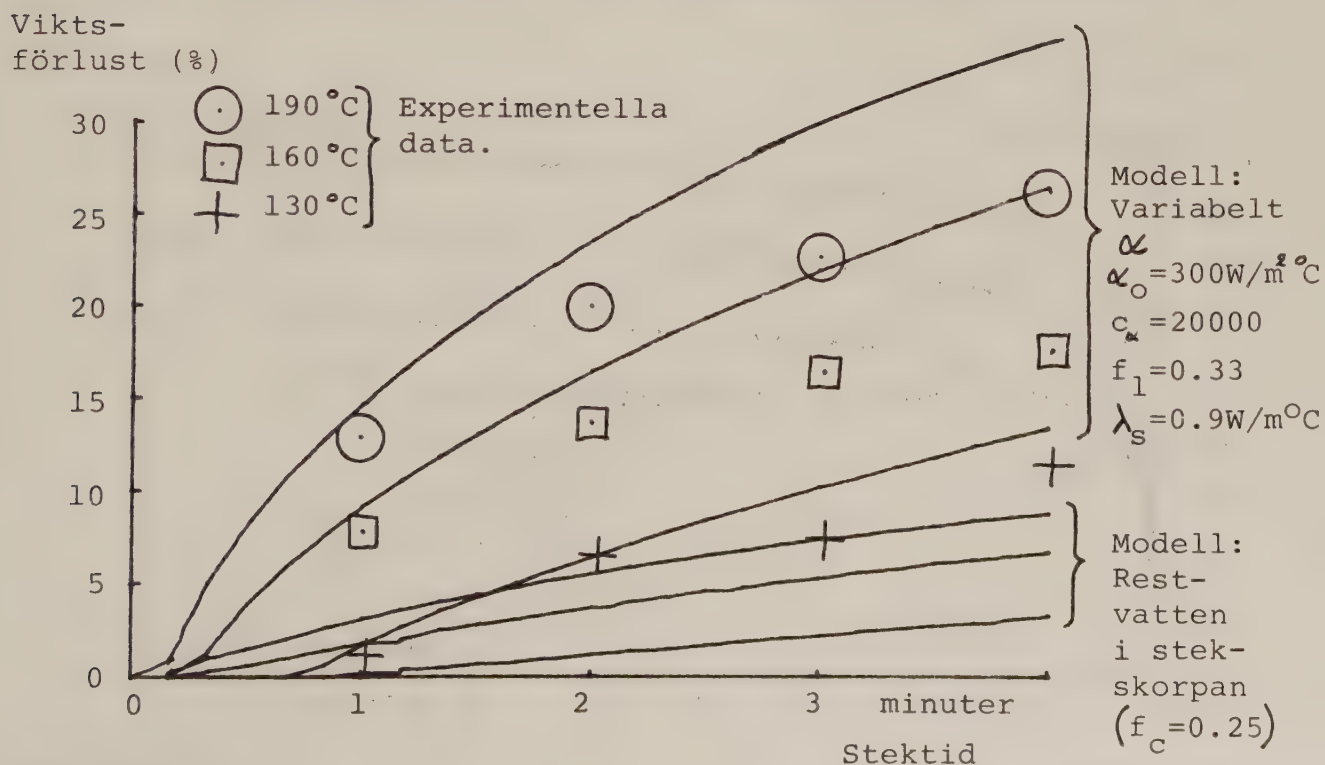
Figur 41.

Värmeöverföringstalet ökar alltså mycket kraftigt i samband med att köttbullen börjar koka i ytan. Därefter stabiliseras α -värdet vid ca $800 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Det bör redan här noteras att värdet på värmeledningstalet för stekskorpan (λ_s) är svårt att bestämma. Dagerskog /7/ anger intervallet $0.20\text{--}0.65 \text{ W/m, } ^\circ\text{C}$. I simuleringen i figur 40 antogs $\lambda_s = 0.90 \text{ W/m, } ^\circ\text{C}$. Skälet till detta var att rimliga värden på α annars inte skulle erhållas. Man får göra en avvägning mellan högt α eller högt λ_s . Det är svårt att med någon säkerhet experimentellt eller teoretiskt fastlägga α och λ_s .

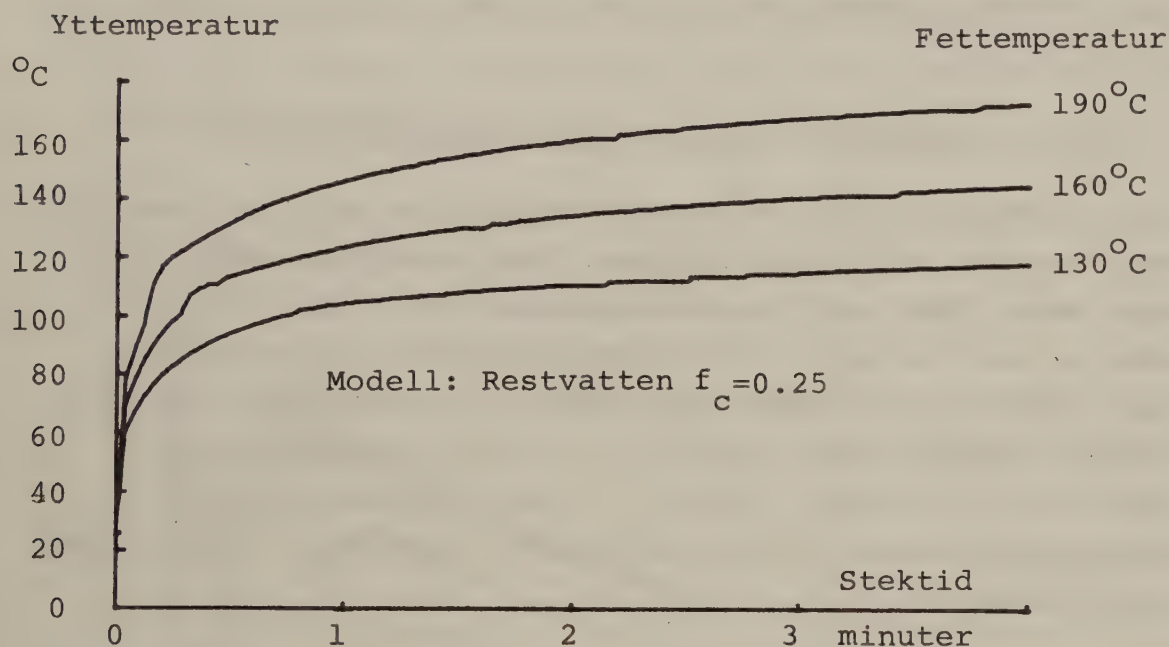
10. Simuleringar av viktsförlust, yttemperatur m m.

Centrumtemperatursimuleringarna visade att bara två modeller kunde uppvisa godtagbar överensstämmelse mellan modell och experiment. Nämligen "restvattenmodellen" (figur 37) och modellen med variabelt värmeöverföringstal (figur 40). Vi skall därför se på dessa modellers möjligheter att rätt beskriva viktsförlusten, som är en viktig parameter vid industriell stekning. I figur 42 har modellerna åskådliggjorts tillsammans med experimentellt uppmätta viktsförluster enligt figur 14.

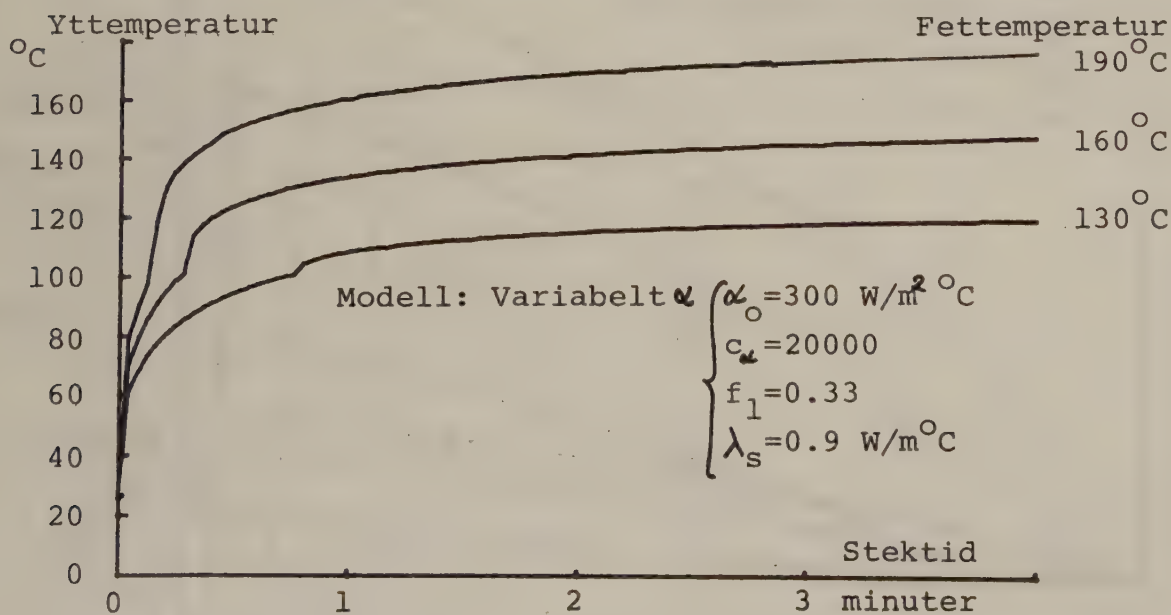


Figur 42.

Det framgår tydligt att restvattenmodellen ger för låga viktsförluster, medan den andra modellen ger något för höga viktsförluster. Det kan också vara intressant att se på yttemperaturförloppet vid simulering av de båda modellerna. Det framgår av figur 43 och 44 att yttemperaturförloppen också är olika. De högre yttemperaturerna i figur 44 beror på att α -värdet där är högre. Yttemperaturen är svår att mäta vid fritering, varför det är omöjligt att direkt experimentellt vederlägga en modell på grundval av yttemperaturförloppet.

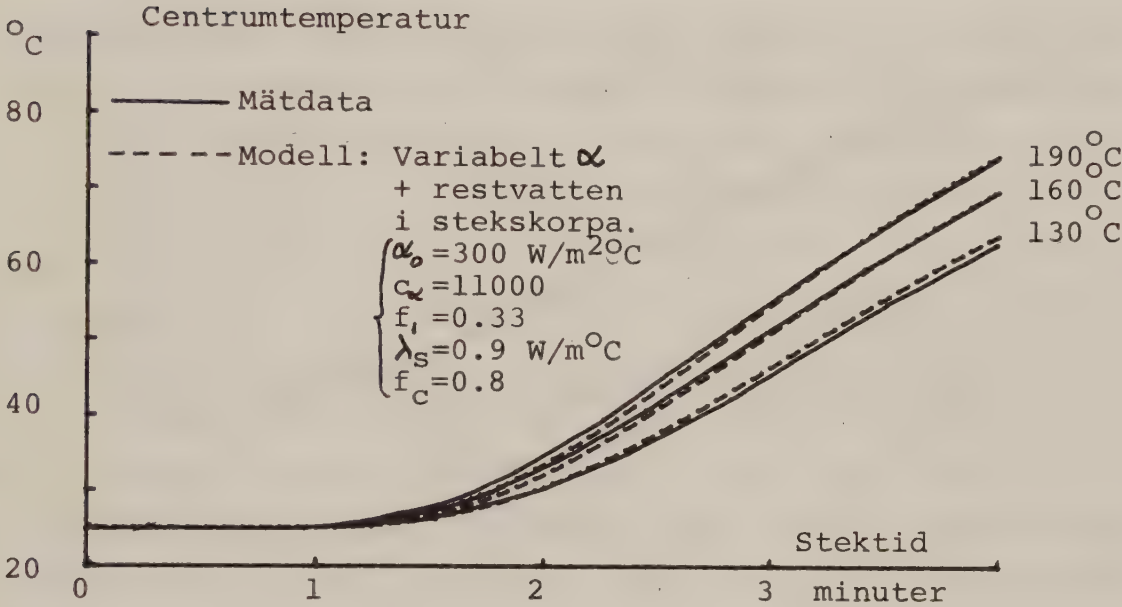


Figur 43.

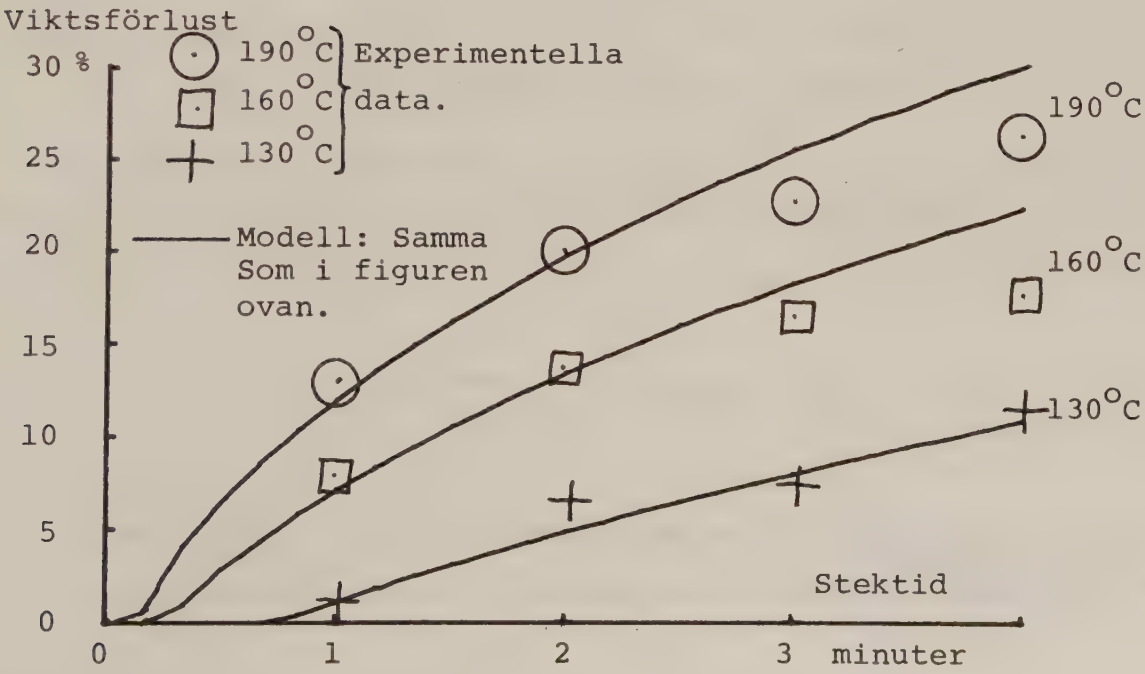


Figur 45.

Båda modellerna har sina för- och nackdelar. Verkligheten torde ligga någonstans emellan de båda modellerna. Det är därför naturligt att kombinera dem. I de följande två figurerna visas centrumtemperatur respektive viktsförlust när modellerna kombinerats. Den kombinerade modellen överensstämmer således väl med experimenten.



Figur 45.



Figur 46.

11. Simulering av biffstekning.

Hittills har det bara handlat om fritering av köttbullar. Modellen är dock avsedd att användas även för andra geometrier än den sfäriska och även för andra stekmetoder. Fritering av pannbiff är mycket vanligt industriellt. Detta skall modellen kunna simulera. Men för att jämföra modell med experiment när det gäller biffar, är det bättre att simulera stekning i dubbelhäll. Det vore annars svårt att erhålla en konstant tjocklek vid fritering av biffar.

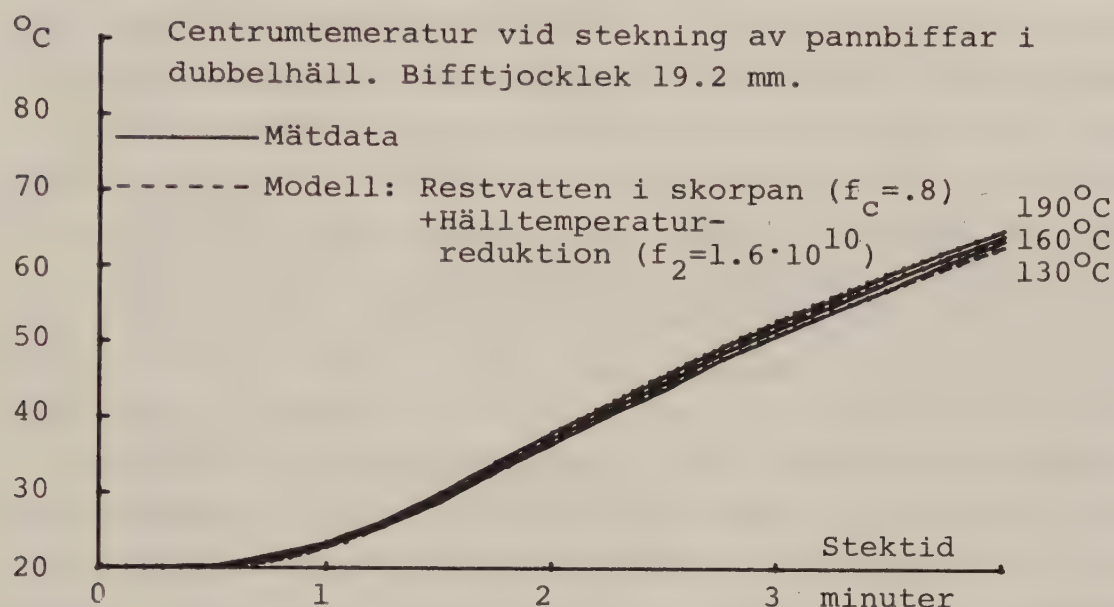
Dubbelhällen motsvaras industriellt av bandstekning mellan två teflonband. Värmeöverföringstalet påverkas naturligtvis inte på samma sätt här, som vid fritering. Det är istället så att hög ångavgång sänker drivkraften för värmeöverföringen, d v s omgivningstemperaturen. Om man studerar ytan på hällstekta biffar /2/ kan man se att stekytan består av ljusa och mörka områden. De ljusa har inte haft kontakt med hällen. De mörka områdena blir allt mörkare och bredare under stekningens gång, medan de ljusa förblir ljusa hela tiden. Detta tyder på att värmeöverföringen sker genom direkt värmeledning via de mörka områdena parallellt med konvektiv värmeöverföring via de ljusa områdena. Ångan håller oberoende av hälltemperaturen de ljusa områdena nere vid cirka 100°C. Skenbart blir på detta sätt drivkraften, d v s hälltemperaturen reducerad. Denna mekanism förklarar varför hälltemperaturen har så liten betydelse för centrumtemperaturen /2/.

Ovanstående mekanism kan simuleras genom att anta att (den skenbara) hälltemperaturen är en funktion av ångflödet enligt följande ekvation:

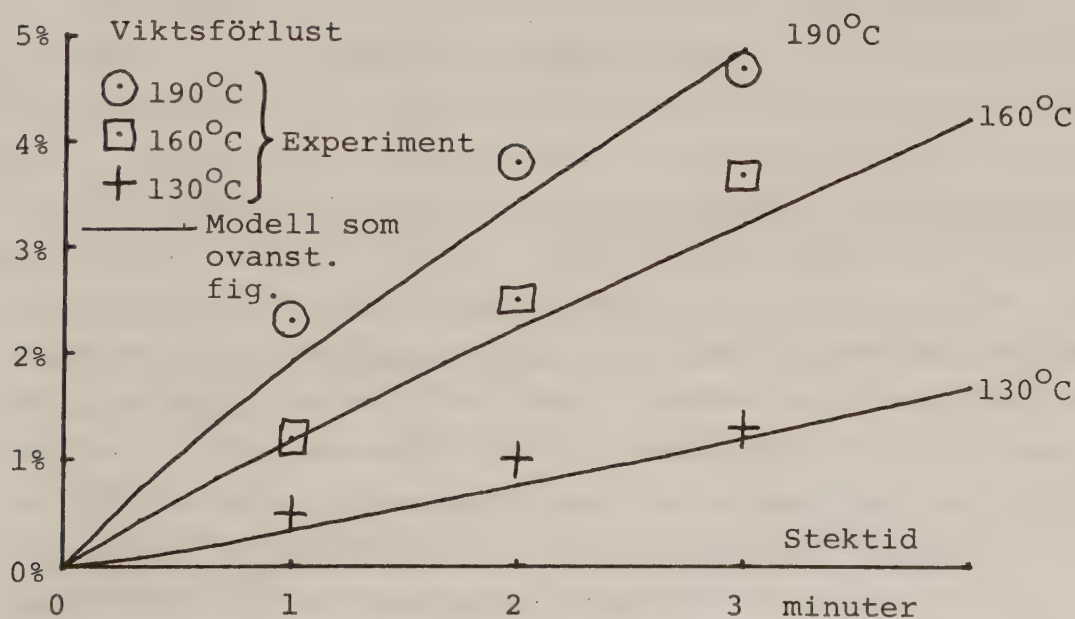
$$(t_{\infty})_w = (t_{\infty} - t_{bp}) \cdot \exp(-f_2 \cdot \sqrt{w_{out}}) + t_{bp} \quad (31)$$

d v s drivkraften reduceras med en faktor som är beroende av ångflödet från ytan.

Nedan visas hur denna modell ansluter till experiment. Centrumtemperaturförloppet stämmer mycket bra, medan viktsförlusten experimentellt ligger något över modellen, vilket kan bero på att vägningen i detta fallet utfördes cirka en halv minut efter aktuell stektid.



Figur 45.



Figur 46.

12. Praktiska applikationer.

Modellen kan användas för varje godtycklig kombination av produktgeometrierna sfär och platta, med stekmetoderna fri-tering, kontaktstekning, konvektionsstekning och varmluftstunnel. Vid konvektionsstekning måste ett skenbart värmeöverföringstal ansättas, eftersom avdunstningen innan ytan nått kokpunkten inte är inplementerad i modellen. Stekning med infravärme kan ännu inte simuleras med denna modell, därför att värmeövergången då är beroende av ytans ljushet. Det skulle föra för långt att i denna rapport visa att modell och experiment stämmer överens i varje speciellt fall. I praktiken bör man alltid vid simulering av en process utgå från visst experimentellt underlag. Framför allt kan receptet ha stor betydelse för viktsförlust och ytfärg, varför dessa parametrar bör mätas vid så realistiska förhållanden som möjligt. Man har sedan möjlighet att ändra på vissa parametrar till modellen så att överensstämmelse nås med mätningarna. Sådana parametrar som kan ändras för att praktiskt "justera" modellen är i första hand c_α , f_c , f_2 och L_0 . Även α_0 kan tänkas behöva justeras om man använder något ovanligt fri-teringsfett.

Sedan modellen sålunda anpassats till de praktiska förhållandena, kan datorsimuleringar /1/ göras för olika stekmetoder, tider, temperaturer m m. Det är särskilt två typer av simuleringar som är intressanta. Dels simulering av en steklinje, bestående av två eller flera steg i serie (eller parallellt). Det är användbart vid projektering av nya anläggningar, då man vill fördela stektiden och effekten optimalt för de olika delstegen. Den andra intressanta typen av simuleringar är optimering av befintliga steklinjer. Det kan t ex gälla att ta reda på vilka korrekationer som behöver göras för bandhastighet och fetttemperatur när produktens ingående smettemperatur ändras. Slutligen kan nämnas att den matematiska modellen är utvecklingsbar till andra typer av produkter. En del av de för färsprodukter vederlagda mekanismerna för värmetransport kan tänkas komma ifråga vid andra processer t ex bakning och torkning.

13. Referenser.

1. Sörenfors, P.
Datorprogram för stekning av köttfärsprodukter,
Rapport 25 aug 1978, Livsmedelsteknik, Alnarp.
2. Dagerskog, M., Sörenfors, P.
A comparison between four different methods of frying
meat patties, Part 1 and 2.
Lebensmittel Wissenschaft und Technology vol 11 (1978)
3. Sörenfors, P.
Determination of the thermal conductivity of minced meat.
Lebensmittel Wissenschaft und Technology vol 7 (1974)
no 7.
4. Sörenfors, P.
Mätning av centrumtemperatur med termoelement under
stekning.
Rapport 4 sept 1978, Livsmedelsteknik, Alnarp.
5. Carslaw, H.S., Jaeger, J.C.
"Conduction of heat in solids".
Oxford University Press, London 1959.
6. Sörenfors, P., Dagerskog, M.
Bestämning av värmetekniska data för köttfärs som
funktion av temperatur och receptur.
SIK-rapport nr 434. SIK, Göteborg.
7. Dagerskog, M.
Stekning av livsmedel, Doktorsavhandling, Göteborg 1978.
8. Krischer, O.
Die wissenschaftliche Grundlagen der Trocknungstechnik.
Berlin 1963.
9. Lykov, A.V.
Heat and mass transfer in capillary-porous bodies.
London 1966.
10. Krischer, O. et al.
Wärmeleitung und Dampfdiffusion in feuchten Gütern.
VDI-Forschungsheft 402, VDI-Verlag GMBH, Berlin 1940.

11. Housova, J.
The baking process - mathematical model of heat and mass transfer.
EFCE minisymposium: Mathematical modelling in food processing, Sept. 7-9, Örenäs, Sweden.
12. Bomberg, M.
Moisture flow through Porous Building Materials.
Div. of Building techn., Lund inst. of techn., Lund, Sweden 1974.
13. Lykov, A.V. et al.
Theoretical investigation of vapour transfer through a capillary-porous body.
Int. J. of Heat and Mass Transfer, vol 17, 1974, p 961-970.
14. Lykov, A.V.
Systems of differential equations of Heat and Mass Transfer in capillary-porous bodies (Review). Int. J. of Heat and Mass Transfer, vol 18, 1975, p 1-14.
15. Sörenfors, P., Ånäs, A.
Apparatus for measuring the humidity of air above 100°C.
Laboratory Practice, vol 26, 1977, p 549-550.
16. Bankvall, C.
Värmetransport i fibrösa material.
Inst. för byggnadsteknik, LTH, Lund 1970.
17. Moore, N.R.
Thermally induced transport phenomena in partially saturated porous media.
Heat Transfer Conference, Tokyo, 1974. CT3.6.
18. Kerber, R. et al.
Wärmeleitung in Zwei-Phasen-Systemen fest/flüssig.
Chem. Ing. Techn. vol 40 1968, p 1176-1180.
19. Leyers, H.J.
Wärmeleitung von Losen Kugelschüttungen in stagnierenden Medien.
Chemie Techn. vol 44, 1972, p 1109-1115.

20. Bankvall, C.

Natural convective heat transfer in insulation structures.

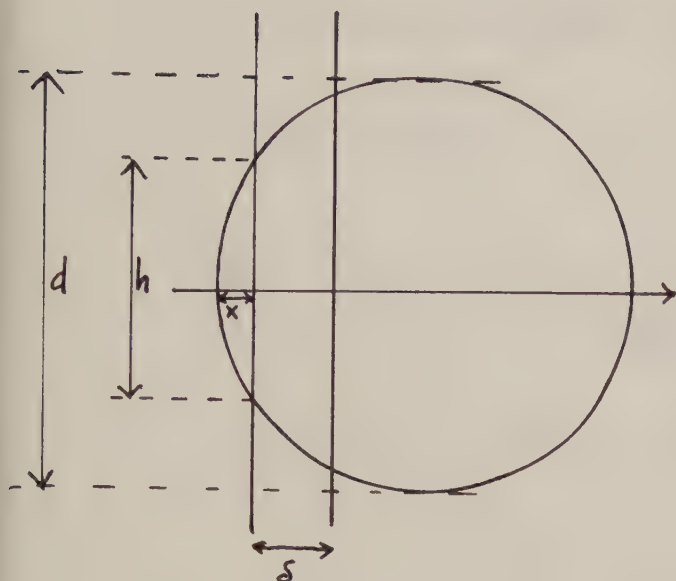
Division of building techn., Lund inst. of techn.,
Lund, Sweden, 1972.

14. Beteckningar.

a	temperaturledningstal	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
c	vattenhalt	$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$
c_o	ursprungsvattenhalt	$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$
c_p	värmekapacitet	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
c_α	värmeöverföringskonstant	
d	pordiameter	m
f_c	vattenhaltskonstant	-
f_1	exponentkonstant	
f_2	exponentkonstant	
g	geometrital (0=platta, 1=sfär)	-
g_o	tyngdaccelerationer	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
h	håldiameter	m
h_{max}	maximal håldiameter	m
k	diffussionstal för ånga i luft	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
k_L	ljushetskonstant	
k_φ	porositetskonstant	$^\circ\text{C}^{-1}$
m	massa	kg
n	antal	-
q	värmeeffekt	W
r	ångbildningsvärme	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
t	temperatur	$^\circ\text{C}$
t_b	begynnelsestemperatur	$^\circ\text{C}$
t_{bp}	kokpunkt	$^\circ\text{C}$
t_{korrr}	korrigerad temperatur	$^\circ\text{C}$
t_R	yttemperatur	$^\circ\text{C}$
$t_1 \}$ $t_2 \}$	temperaturer	$^\circ\text{C}$
t_∞	omgivningstemperatur	$^\circ\text{C}$
$(t_\infty)_w$	skenbar hålltemperatur	$^\circ\text{C}$

w_{out}	ångflöde	$kg \cdot s^{-1}$
x	längdkoordinat	m
x	ljushetskoordinater	-
y		
z		
D	diameter	m
E_a	aktiveringsenergi	$kJ \cdot mol^{-1}$
G	ångmängd	kg
L	ljushet	-
P_D	partialtryck	$N \cdot m^{-2}$
P_O	lufttryck	$N \cdot m^{-2}$
Q	värmefflöde	$W \cdot m^{-2}$
Q_D	diffusionsvärme	$W \cdot m^{-2}$
Q_L	värmefflöde vid enbart ledning	$W \cdot m^{-2}$
R	radie eller halv biff tjocklek	m
R_a	Rayleighs tal	-
R_D	gaskonstanten för ånga	$J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ K^{-1}$
R_x	ljushetsvärden	-
R_y		
R_z		
R'	avstånd mellan centrum och kokpunktsisoterm	m
S	summa i ekv 8	-
T	temperatur	$^\circ K$
α	värmeöverföringstal	$W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$
α_o	begynnelsevärmeöverföringstal	$W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$
β	volymsutvidgningskoefficient	$^\circ C^{-1}$
δ	tjocklek	m
λ	värmeledningstal	$W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$
λ_{por}	ekvivalent värmeledningstal för en por	$W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$

λ_s	värmeledningstal i stekskorpa	$W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$
λ_L	värmeledningstal för luft	$W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$
λ'	ekvivalent värmeledningstal	$W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$
ν	kinematisk viskositet	$m^2 \cdot s^{-1}$
ρ	täthet	$kg \cdot m^{-3}$
φ	porositet	-
φ_{max}	maxporositet	-
φ_{medel}	medelporositet	-
τ	tid	s
τ_R	tid korresponderande mot radien R	s
ΔT	temperaturskillnad	$^\circ C$

Bilaga 1. Härledning av porradie.

$$\begin{cases} d = \text{diametern för poren} \\ h = \text{hålets diameter} \\ \delta = \text{Snittets tjocklek} \\ x = \text{Stokastisk lägesvariabel} \end{cases}$$

Antag att vi vill veta medelvärdet av h för vissa d och δ . Vi beräknar därför först h enligt kordasatsen:

$$\begin{aligned} \left(\frac{h}{2}\right)^2 &= x \cdot (d-x) \\ h &= 2 \cdot \sqrt{x \cdot (d-x)} \dots\dots (1) \end{aligned}$$

x är en rektangelfördelad stokastisk variabel mellan noll och $\frac{d-\delta}{2}$. För större x -värden fås ett symmetriskt fall. Frekvens-

funktionen för x blir:

$$\begin{aligned} f(x) &= \frac{2}{d-\delta} \quad +y: \\ \int_0^{\frac{d-\delta}{2}} \frac{2}{d-\delta} \cdot dx &= 1 \dots\dots (2) \end{aligned}$$

Hur ser då frekvensfunktionen för h ut?

Vi substituerar x mot h , vilket betyder att ekv. 1 måste lösas med avseende på x :

$$x = \frac{d - \sqrt{d^2 - h^2}}{2} \dots\dots (3)$$

Efter differentiering erhålles:

$$dx = \frac{h \cdot dh}{2 \cdot \sqrt{d^2 - h^2}} \dots\dots (4)$$

Samma undre gräns erhålles enligt ekv. 1

Om den övre gränsen $x = \frac{d-\delta}{2}$ insättes i ekv. 1 erhålles ny övre gräns:

$$h_{\max} = \sqrt{d^2 - \delta^2} \dots\dots (5)$$

Ekv (4) och (5) insätts i (2):

$$\int_0^{\sqrt{d^2 - \delta^2}} \frac{h}{(d - \delta) \sqrt{d^2 - h^2}} \cdot dh = 1 \dots (6)$$

Frekvensfunktionen för h är alltså:

$$f(h) = \frac{h}{(d - \delta) \sqrt{d^2 - h^2}} \dots (7)$$

Medelvärde av h kan integreras fram enligt:

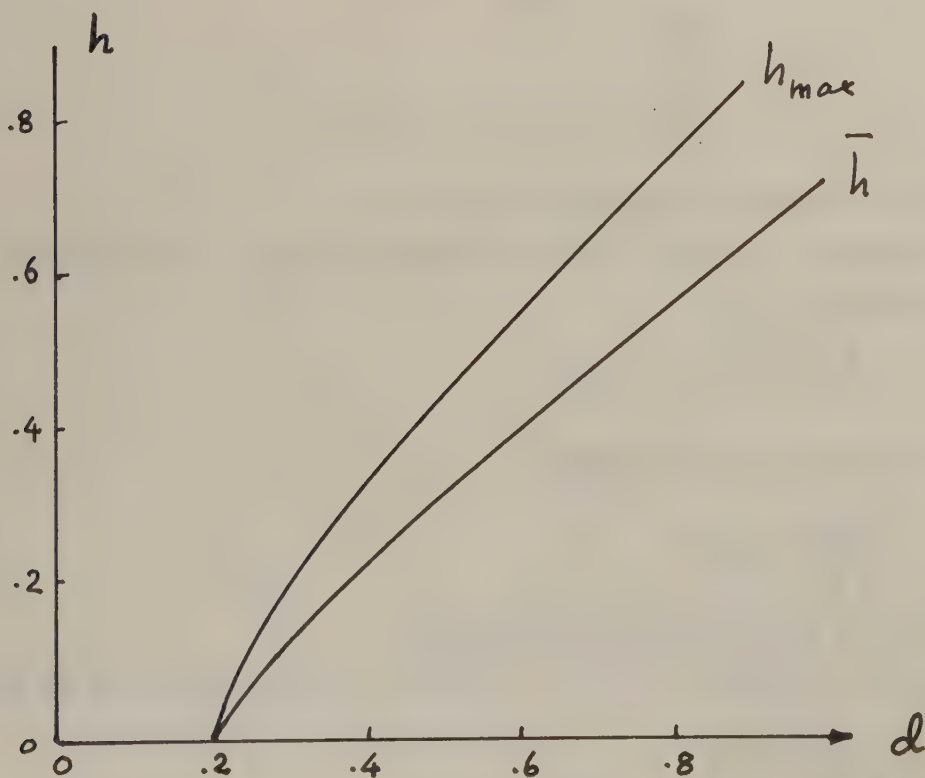
$$\bar{h} = \int f(h) \cdot h \cdot dh \dots (8)$$

Efter insättning av (7), integrering och insättning av integrationsgränserna fås:

$$\bar{h} = \frac{d^2}{2(d - \delta)} \cdot \left[\cos^{-1} \left(\frac{\delta}{d} \right) - \frac{\delta}{d} \sqrt{1 - \left(\frac{\delta}{d} \right)^2} \right] \dots (9)$$

För $\delta = 0.2$ mm erhålles (mm):

d	$\bar{h}$	$h_{\max}$	$\frac{\pi}{4} \cdot d$
0.25	0.102	0.150	0.196
0.30	0.155	0.224	0.236
0.50	0.330	0.458	0.393
1.00	0.733	0.980	0.785
1.60	1.208	1.587	1.257



Bilaga 2: Medelvattenhalt i stekskorpan.

Enligt sorptionsförsök erhöles sambandet

$$c = c_o \cdot \left(\frac{100-93}{t-93} \right)^2$$

där c är vattenhalt i stekskorpan

c_o är begynnelsevattenhalten

och t är den lokala temperaturen.

Om vi antar att temperaturprofilen är linjär i stekskorpan erhöles:

$$t = t_R - (t_R - 100) \cdot \frac{R-x}{R-R'}$$

där t_R är yttemperaturen

R är avståndet från centrum till ytan

R' är avståndet från centrum till skorpan

och x är avståndet från centrum till den betraktade punkten
som alltså har temperaturen t .

Medelvattenhalten erhöles då definitionsmissigt som:

$$\bar{c} = \frac{\int_{R'}^R c \cdot dx}{\int_{R'}^R dx}$$

Genom att i denna ekvation införa uttrycket för c och där-
efter substituera t med motsvarande uttryck erhöles:

$$\bar{c} = \frac{c_o \cdot (100-93)^2}{R-R'} \cdot \int_{R'}^R \frac{dx}{\left[t_R - (t_R - 100) \cdot \frac{R-x}{R-R'} - 93 \right]^2}$$

vilket efter en del räkningar ger:

$$\bar{c} = c_o \cdot \frac{100-93}{t_R-93}$$

Bilaga 3. Medelporositet.

Antag att porositeten är:

$$\varphi = \varphi_{\max} \cdot \exp(k_{\varphi} \cdot (t - 100))$$

och antag att temperaturen är:

$$t = t_b + (100 - t_b) \cdot (1 - \cos(\frac{\pi \cdot x}{2 \cdot R}))$$

Medelporositeten erhålles ur:

$$\varphi_{\text{medel}} = \frac{\int_0^R 4 \cdot \pi \cdot x^2 \cdot \varphi \cdot dx}{\int_0^R 4 \cdot \pi \cdot x^2 \cdot dx}$$

Om φ och t elimineras mellan dessa tre ekvationer erhålles efter förenklingar:

$$\varphi_{\text{medel}} = \varphi_{\max} \cdot \int_0^1 3 \cdot \left(\frac{x}{R}\right)^2 d\left(\frac{x}{R}\right) \cdot \exp\left[-k_{\varphi} \cdot (100 - t_b) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} \left(\frac{x}{R}\right)\right)\right]$$

vilket för $t_b = 25$ och $k_{\varphi} = 0.05$ kan beräknas till:

$$\underline{\underline{\varphi_{\text{medel}} = 0.374 \cdot \varphi_{\max}}}$$

Bilaga 4: Ljushetsformel.

När ekvation 11 och 12 i kapitel 8.5 slås samman erhålles:

$$\tau_R = \tau + 50 \cdot (g+1) \cdot 10^{\log \frac{R}{0.016}}$$

detta gäller vid 180 sek.

Om man antar att korrektionen är proportionell mot tiden erhålles:

$$\tau_R = \tau + \frac{\tau \cdot 50}{180} \cdot (g+1) \cdot 10^{\log \frac{R}{0.016}}$$

När detta införes i ekv 9 (sid 44) erhålles:

$$L = 24 \cdot \exp(-k_L \cdot \tau \cdot (1 + 0.277 \cdot (g+1) \cdot 10^{\log(R/0.016)}))$$

$$\text{där } k_L = 3300 \cdot \exp(-6000/(t_\infty + 273))$$

DATORPROGRAM FÖR STEKNING
AV KÖTTFÄRSPRODUKTER

Alnarp 1978-08-25

Per Sörenfors
Avd för Livsmedelsteknik
Tekniska högskolan i Lund

Innehållsförteckning.

	sid
Sammanfattning	2
Beteckningar på variabler	3
Inledning	4
Program för stekning	4
Matematisk modell	5
Numerisk lösningsmetod	6
Finit-differens-schema	7
Härledning av numeriska ekvationer	8
Ekvationer för stekskorpan	9
Ekvationer för innanmätet	10
Frontvandningsberäkning	16
Fysikaliska konstanter	19
Ekvation för vattenförlust m m	20
Programstruktur	22
Referensschema för stekprogram	23
Beskrivning av subrutiner	24
Kommandostrukturen	27
Exempel på körningar	27
Praktiska tillämpningar	30
Referenser	32
Bilagor	

Sammanfattning.

Föreliggande rapport beskriver ett datorprogram för stekning av köttfärsprodukter. Den ingående matematiska modellen tillåter att värmeledningstalet kan vara konstant, funktion av receptet och temperaturen eller/och beroende av ångdiffusion. Värmeövergångstalet kan sättas som en funktion av ångflödet från produktens yta. Modellen kan simulera frontvandring, d v s att kokpunktsisotermen rör sig inåt under det att stekskorpa bildas.

Programmet är avsett att köras i dialogform från terminal och är därför försett med en kommandostruktur som gör det lätt att kommunicera med datorn. Beräkningsarbetet kan t ex styras med kommandon så att programmet stoppas då vissa villkor är uppfyllda. Man har sedan möjlighet att titta på resultat och ändra parametrar (t ex byta stekmetod) och sedan fortsätta steka igen där man avbröt. Utmatning av resultat kan ske på flera sätt bl a direkt uppritning på XY-plotter eller som tabeller via radskrivare. Exempel på resultat är centrumtemperatur, viktsförlust, ytljushet och energiåtgång. Allt som funktion av tiden.

Programmet kan användas för projektering och drift av steklinjer, men också för forskning inom värmetransportteori.

Beteckningar på variabler.

b	stabilitetsvillkor	-
c	vattenhalt	kg/kg
c_{cr}	medelvattenhalten i stekskorpan	kg/kg
c_p	värmekapacitet	J/kg ^{°C}
c_{pv}	värmekapacitet för vatten	J/kg ^{°C}
c_α	konstant i ekv 42	-
f	fetthalt	kg/kg
f_1	konstant i ekv 42	-
f_2	konstant i ekv 43	s/kg
g	geometrital (0 för platta, 1 för sfär)	-
i	gitterpunktens nummer	-
j	tidsstegets nummer	-
m	vikt	kg
n	antal delningar av längdkoordinaten	-
q	värmeeffekt för vattenavkokning	W
q_{acc}	i produkten ackumulerad värmeeffekt	W
q_{in}	ingående värmeeffekt	W
t	temperatur	°C
t_{bp}	vattnets kokpunkt	°C
t_R	yttemperatur	°C
t_∞	omgivningstemperatur	°C
w	vattenförlust	kg
A	produktens ytteryta	m ²
A'	ytan vid kokpunktsisotermen	m ²
R	avståndet från centrum till ytan	m
R'	avståndet från centrum till kokfronten	m
s	analogt punktnummer för kokfronten	-
x	längdkoordinat	m
w_{out}	vattenförlust per tidsenhet	kg/s
α	värmeöverföringstal	W/m ² °C
α_0	värmeöverföringstal	W/m ² °C
γ	ångbildningsvärme	J/kg
δ	skorpans tjocklek	m
Δx	längdsteg	m
$\Delta \tau$	tidssteg	s
λ	värmeledningstal	W/m ^{°C}
λ_s	stekskorpans värmeledningstal	W/m ^{°C}
φ	porositet	-
ρ	täthet	kg/m ³
τ	tid	s

Inledning.

Inom industrin sysselsätter man sig i allt större utsträckning med matematiska modeller och datateknik för att styra sina processer. Med denna teknik kan man dimensionera och optimera sina processer, inbespara personal, höja utbytet etc. Inom livsmedelsområdet har det gått trögt med införande av datateknik i produktionen. Detta brukar förklaras med att livsmedelsindustrin sedan gammalt är en hantverksindustri och att datorer inte skulle kunna klara av att "anrätta mat". Inom vissa delar av livsmedelsindustrin kan man dock ha stor nytta av datorer. Det gäller särskilt på steksidan, där man har en dyrbar produktion och där produktionen inte är så enkel att styra. Datorn skulle här kunna hjälpa till att hålla en jämnare kvalitet och lägre förluster. Behovet av datateknik är dessutom större när man, som vid stekning, inte känner de verkliga fysikaliska förloppen.

Inom steksektorn ser vi idag också en stark vilja att utveckla nya processer, t ex infra- och konvektionsstekning. I ett projekteringsskede är datatekniken synnerligen användbar. Man kan bland annat pröva olika kombinationer av stekutrustning i förening med olika produkter.

Program för stekning.

På stekområdet har alltså datorn framtiden för sig. Skälet till att man ännu inte anlitar datorer i någon större utsträckning för stekning torde vara bristen på stekprogram, som i sin tur också beror på att goda matematiska modeller inte är allmänt förekommande. Vi har därför tagit fram ett antal modeller för stekning och implementerat dem i föreliggande program.

Programmet är egentligen framtaget just för att testa olika matematiska modeller, varför det kan sägas vara överdimensionerat för vanliga enkla stekningar. Men detta hindrar inte att det kan användas i denna form både för styrning av

gamla processer och för projektering av nya. Dessutom är programmet under ständig utveckling. I nuvarande form kan man steka platta och runda produkter d v s pannbiffar och köttbullar. De stekmetoder som hittills går att använda är kontaktstekning och fritering samt i viss utsträckning konvektionsstekning. Dessutom kan man simulera temperatur-utjämning i t ex ångtunnel.

Efterhand kommer även infrastekning och kontaktstekning med vändning av produkten att införas. Dessutom kommer programmet att förenklas så att det omfattar bara en modell, vilket gör det billigare att köra.

Matematisk modell.

I den fortsatta texten kommer ett antal ekvationer för bl a värme- och massbalanser samt empiriska ekvationer från experimentella undersökningar, att anges. De refereras då /inom klammer/ till den publikation varifrån de hämtats.

Följande "allmänna" modell ligger till grund för programmet:

- 1) Produkten utgöres av sfär eller platta.
- 2) Värmetransporten i produkten redovisas som värmeledning.
- 3) Ett därigenom skenbart värmeledningstal är funktion av recept och temperatur samt även beroende av den lokala porositeten som ger bidrag till värmetransporten genom ångdiffusion.
- 4) Tätheten och värmekapaciteten antas vara funktioner av recept och temperatur.
- 5) När stekytan nått kokpunkten 100°C antas stekskorpa börja bildas. Den definieras som den del av produkten, som ligger mellan 100°C -isotermen och ytan. Stekskorpan vattenhalt antas utgöra ett integrerat medelvärde av den lokala jämviktsvattenhalten enligt sorptionsisotermen.
- 6) Stekskorpan växer på så sätt att skillnaden mellan genom ytan tillfört värme och i produkten ackumulerat värme, antas koka av motsvarande mängd vatten.
- 7) Masstransport innanför 100°C -isotermen antas inte förekomma, förutom den som hänför sig till under punkt 3 nämnda ångdiffusion.

- 8) Värme tillföres ytan genom konvektion.
- 9) Värmeöverföringstal antas vara beroende av ångtransporten från ytan.
- 10) Fettsmältning inuti produkten anses vara inbakat i c_p -data.
- 11) Produkten antas bibehålla sin storlek hela tiden.

Numerisk lösningsmetod.

Eftersom modellen är för komplicerad för att ha en exakt matematisk lösning, t ex på grund av frontvandringsfenomenet, användes en numerisk metod, den s k finita differensmetoden. Det är den allra vanligaste och enklaste metoden för stationär värmetransport. Det är viktigt att metoden är enkel om man vill införa nya parametrar efter hand i programmet, för då blir ingreppen minimala.

Finita differensmetoden /3, 4, 5, 6/ bygger på att produkten tillföres ett antal punkter med konstant mellanrum. Även tiden delas in i lagom stora steg. Temperaturen i varje punkt kan sedan beräknas som funktion av temperaturen i omgivande punkter. Gränspunkter beräknas via randvillkoren. Dessa beräkningar göres för varje tidssteg. Temperaturberoende "konstanter" räknas också om i varje punkt och tidssteg.

Det finns många olika sätt att uttrycka derivatorna numeriskt. Ett sådant uttryck kallas för en analog. Den enklaste analogen för första derivatan är:

$$\left(\frac{dt}{dx}\right)_i = \frac{t_{i+1} - t_i}{\Delta x}$$

Felet är här proportionellt mot längdsteget Δx . En noggrannare analog är:

$$\left(\frac{dt}{dx}\right)_i = \frac{t_{i+1} - t_{i-1}}{2 \cdot \Delta x}$$

Här är felet proportionellt mot $(\Delta x)^2$. Fördelen med denna analog är alltså att felet blir mindre.

Liknande uttryck kan uppställas för högre derivator.

I föreliggande program användes analoger av båda typerna. Längdsteget väljes sedan så litet att tillräcklig noggrannhet erhålles. Här kan nämnas att en unik kontrollmöjlighet finnes för att programmet är rätt: Inget resultat får vara beroende av Δx när Δx är litet. D v s lösningens alla variabler måste, för ett visst längd- och tidssteg, konvergera mot ett konstant värde då Δx minskas.

Då analogerna införes i värmeledningsekvationen uppstår beroende på vilka analoger som valts, två olika typer av ekvationer, explicita och implicita. Här kommer bara den explicita formen att användas, som innebär att temperaturen i en viss punkt, vid ett visst tidssteg, bara är en funktion av redan beräknade temperaturer, t ex förra tidsstegets. Crank-Nicolsons ekvation är exempel på en implicit ekvation, där alltså temperaturen i en punkt är en funktion av temperaturer i samma tidssteg, vilket leder till ett ekvations-system med minst lika många ekvationer som antalet punkter i längdriktningen.

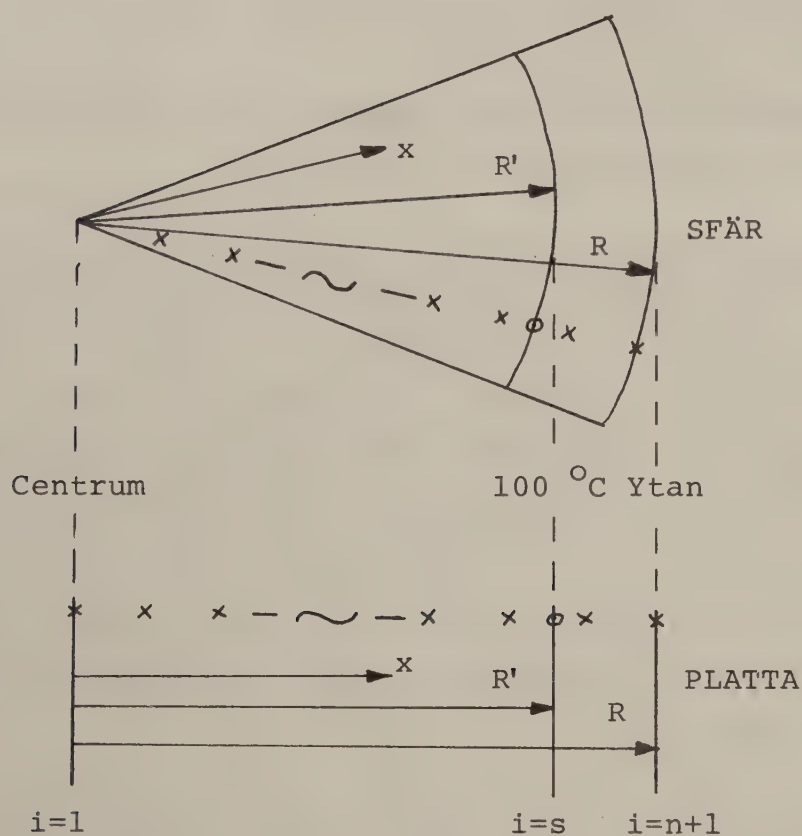
Crank-Nicolsons ekvation är mycket noggrann: felet är proportionellt mot både $(\Delta x)^2$ och $(\Delta \tau)^2$ (=tidssteget²), men framför allt är lösningen stabil för alla förhållanden mellan tids- och längdsteget.

Den vanliga ekvationen, som användes här, är bara stabil om $\Delta \tau / (\Delta x)^2$ är mindre än ett visst värde. Crank-Nicolsons ekvation är visserligen olämplig att använda i föreliggande program, men för en punkt är den nödvändig, nämligen för punkten närmast innanför 100^o-isotermen. Avståndet mellan denna punkt och den som ligger på 100^oC-isotermen, är alltid mindre än Δx och går mot noll strax före passagen. Därför kan $\Delta \tau / (\Delta x)^2$ inte hela tiden uppfylla det tidigare nämnda villkoret.

Finit-differensschema.

Både i fallet sfär och platta erhålles ett tvådimensionellt problem där en x-koordinat utgör den ena och tiden den andra dimensionen. Produkten (sfär eller platta) indelas i n st delar från centrum till ytan, vilket medför $n+1$ st punkter,

där $i=1$ ligger i centrum och $i=n+1$ ligger i ytan (jämför figur 1).



Figur 1.

Dessutom lägges en extra punkt på den rörliga 100°C -isotermen. Denna har inget nummer. Skorpan och innanmätet kommer nu att matematiskt behandlas på olika sätt.

Härledning av numeriska ekvationer.

Värmeledningsekvationen lyder /1/:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} \cdot \rho \cdot c_p = \lambda \cdot \left[\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{2 \cdot g}{x} \cdot \frac{\partial t}{\partial x} + \frac{d \ln \lambda}{dt} \cdot \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (1)$$

med beteckning enligt den inledande tabblån.

Ekvationer för stekskorpan:

Det faktum att 100°C-isotermen rör sig så långsamt (för normal köttbullsfritering $\sim 10^{-5}$ m/s) gör att temperaturjämvikt i praktiken hinner uppnås i varje tidssteg. Detta innebär att vänstra ledet i ekv 1 är noll. Värmeledningstalets (λ_s) temperaturberoende försummas i stekskorpan av flera skäl, framför allt därför att effekten av λ_s beräkningsmässigt inbakas i α -värdet.

Kvar står då följande ekvation med randvillkor:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{2 \cdot g}{x} \cdot \frac{\partial t}{\partial x} = 0$$

$$\begin{cases} x = R' \\ t = t_{bp} \end{cases} \quad \begin{cases} x = R \\ t = t_R \end{cases}$$

Detta löses exakt och någon numerisk analogekvation behövs alltså inte för skorpan. Lösningen blir:

$$t = t_R - (t_R - t_{bp}) \cdot \left(\frac{R'}{x} \right)^g \cdot \frac{(R-x)}{(R-R')} \quad (2)$$

Den enda okända variabeln i ekvation 2 är t_R vilken erhålles ur värmebalansen vid ytan ($x=R$):

$$\alpha \cdot (t_\infty - t_R) = \lambda_s \cdot \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)_R \quad (3)$$

Derivatans i högra ledet erhålles genom att derivera ekv 2:

$$\left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)_R = \left(\frac{R'}{R} \right)^g \cdot \frac{(t_R - t_{bp})}{(R - R')} \quad (4)$$

Om ekvation 4 insättes i ekv 3 erhålles efter förenklingar:

$$t_R = \frac{Bi \cdot t_\infty + f(R') \cdot t_{bp}}{Bi + f(R')} \quad (5)$$

$$\text{där Biots tal: } Bi = \frac{\alpha \cdot R}{\lambda_s} \quad (6)$$

$$\text{och } f(R') = \frac{R \cdot \left(\frac{R'}{R}\right)^g}{R - R'} \quad (7)$$

Ekvationer för innanmätet.

Ekvation 1 förbinds nu med följande randvillkor:

$$\begin{cases} x = 0 \\ \frac{\partial t}{\partial x} = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} x = R' \\ t = t_{bp} \end{cases}$$

Detta system löses numeriskt.

$$\text{Definiera: } \Delta x \cdot n = R \quad (8)$$

$$\Delta x \cdot (i-1) = x \quad (9)$$

Som stabilitetsvillkor används /3,5/:

$$b = \frac{\lambda \cdot \Delta \tau}{g \cdot c_p \cdot (\Delta x)^2} \quad (10)$$

För stabilitet krävs att $b < \frac{1}{2}$. Man kan visa att för både sfär och platta är optimalt värde på $b = 1/6$. I så fall blir felet i den numeriska lösningen proportionellt både mot $(\Delta \tau)^2$ och mot $(\Delta x)^2$.

De i ekvation 1 ingående derivatorna approximeras med analoger erhållna ur Taylorseriens första termer. Taylorutveckling kring punkten $(i, j-1)$ ger:

$$t_{i,j} = t_{i,j-1} + \Delta\tau \cdot \left(\frac{\partial t}{\partial \tau}\right)_{i,j-1} + (\Delta\tau)^2 \cdot \dots \text{etc}$$

vilket kan skrivas:

$$\left(\frac{\partial t}{\partial \tau}\right)_{i,j-1} = \frac{t_{i,j} - t_{i,j-1}}{\Delta\tau} + O(\Delta\tau) \quad *) \quad (11)$$

Utveckling i x-riktningen ger:

$$t_{i+1,j-1} = t_{i,j-1} + \Delta x \cdot \left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)_{i,j-1} + \frac{1}{2}(\Delta x)^2 \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}\right)_{i,j-1} + (\Delta x)^3 \dots$$

$$t_{i-1,j-1} = t_{i,j-1} - \Delta x \cdot \left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)_{i,j-1} + \frac{1}{2}(\Delta x)^2 \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}\right)_{i,j-1} - (\Delta x)^3 \dots$$

Subtraktion och omflyttning ger:

$$\left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)_{i,j-1} = \frac{t_{i+1,j-1} - t_{i-1,j-1}}{2 \cdot \Delta x} + O(\Delta x^2) \quad (12)$$

Denna analog är alltså noggrannare än den i ekv 11 p g a att resttermen kvadreras. Ekvation 11 kunde inte göras på samma sätt, eftersom man inte känner temperaturerna i nästa tidssteg. (Teoretiskt sett går det, men då blir det frågan om implicita ekvationer.)

*) Den inom funktionsanalysen välbekanta funktionen "Ordo" $O(y)$, innebär att gränsvärdet för $\frac{O(y)}{y}$ går mot en konstant då y går mot noll.

En lämplig analog för andra derivatan kan härledas genom att ekvationerna i förra ekvationssystemet adderas. Efter omstuvning fås:

$$\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}\right)_{i,j-1} = \frac{t_{i+1,j-1} - 2t_{i,j-1} + t_{i-1,j-1}}{(\Delta x)^2} \quad (13)$$

När ekvationerna 9, 11, 12 och 13 införes i ekv 1 erhålles, sedan $t_{i,j}$ lösts ut:

$$t_{i,j} = b \cdot \left(1 + \frac{g}{i-1}\right) \cdot t_{i+1,j-1} + (1-2b) \cdot t_{i,j-1} + b \cdot \left(1 - \frac{g}{i-1}\right) \cdot t_{i-1,j-1} + \frac{b}{4} \cdot \frac{d \ln \lambda}{dt} \cdot (t_{i+1,j-1} - t_{i-1,j-1})^2 \quad (14)$$

Om λ ändras kraftigt med temperaturen kan den sista termen inte försummas. Detta är fallet vid simulering av termofusion (eller ekvivalent värmeledning via ångtransport).

För randvillkoret i $x=0$ bör ett uttryck härledas, där felet är proportionellt mot $(\Delta x)^2$.

Vi gör Taylorutveckling igen där tidsteget j underförstås:

$$t_2 = t_1 + \Delta x \cdot \left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)_1 + \frac{(\Delta x)^2}{2} \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}\right)_1 + (\Delta x)^3 \cdot \dots \text{etc.}$$

$$t_3 = t_1 + 2 \cdot \Delta x \cdot \left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)_1 + \frac{(2 \cdot \Delta x)^2}{2} \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}\right)_1 + (\Delta x)^3 \cdot \dots \text{etc.}$$

Om $(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2})_1$, elimineras erhålles:

$$(\frac{\partial t}{\partial x})_1 = \frac{4 \cdot t_2 - t_3 - 3t_1}{2 \cdot \Delta x}$$

Vid $x=0$ är $\frac{\partial t}{\partial x} = 0$, vilket ger:

$$t_1 = \frac{4t_2 - t_3}{3} \quad (15)$$

Det andra randvillkoret skrives

$$t_s = t_{bp} \quad (16)$$

där index s betecknar att punkten ligger på den rörliga 100°C -isotermen.

Innan ytan nått 100°C måste dock ett annat randvillkor användas. På samma sätt, som vid härledningen av ekv 15 erhålles:

$$(\frac{\partial t}{\partial x})_{n+1} = \frac{t_{n-1} - 4 \cdot t_n + 3 \cdot t_{n+1}}{2 \cdot \Delta x}$$

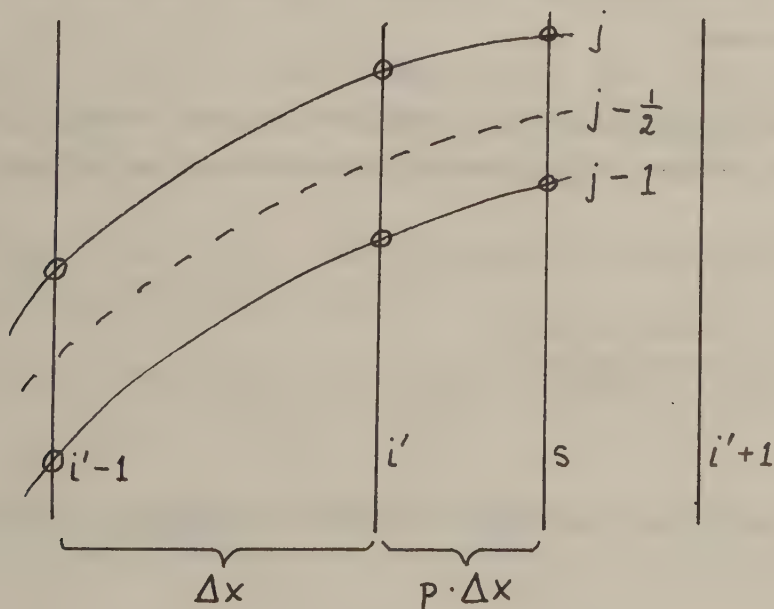
Här måste derivatan beräknas ur värmebalansen i ytan:

$$\alpha \cdot (t_\infty - t_{n+1}) = \lambda \cdot (\frac{\partial t}{\partial x})_{n+1}$$

Om derivatan elimineras mellan de båda ekvationerna erhålles:

$$t_{n+1} = \frac{\frac{2 \cdot \Delta x \cdot \alpha}{\lambda} \cdot t_{\infty} + 4 \cdot t_n - t_{n+1}}{\frac{2 \cdot \Delta x \cdot \alpha}{\lambda} + 3} \quad (17)$$

Istället för ekvation 14 måste, som tidigare nämnts, en särskild ekvation härledas för den punkten som ligger närmast innanför 100°C-isotermen. För det första kommer Crank-Nicolsons analogekvation att användas för att stabilitet i lösningen skall garanteras. För det andra kan analogerna inte tas fram med Taylorutveckling eftersom avståndet mellan gitterpunkterna inte är konstant. Figur 2 visar hur ekvationen skall byggas upp:



Figur 2.

De krökta heldragna linjerna är temperaturkurvan för tidssteget $j-1$ respektive j . I bilaga 1 härleds derivatorna för punkten i' :

$$\left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)_{i'} = \frac{t_{bp} + (p^2 - 1) \cdot t_{i'} - p^2 \cdot t_{i',-1}}{\Delta x \cdot p \cdot (p+1)} \quad (18)$$

$$\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}\right)_{i'} = \frac{2 \cdot [t_{bp} - (p+1) \cdot t_{i'} + p \cdot t_{i',-1}]}{\Delta x^2 \cdot p \cdot (p+1)} \quad (19)$$

Om man prövar med att sätta $p=1$ så ser man att ekvationerna 12 och 13 är specialfall av ovanstående ekvationer.

Crank-Nicolsons metod / 3 / bygger på att man bestämmer derivatorna för tidssteget $j-\frac{1}{2}$ (se figur 2) som medelvärde av d:o för steg j och $j-1$:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{\partial t}{\partial \tau}\right)_{i', j-\frac{1}{2}} = \frac{t_{i', j} - t_{i', j-1}}{k} \\ \left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)_{i', j-\frac{1}{2}} = \frac{\left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)_{i', j} + \left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)_{i', j-1}}{2} \\ \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}\right)_{i', j-\frac{1}{2}} = \frac{\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}\right)_{i', j} + \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}\right)_{i', j-1}}{2} \end{array} \right. \quad (20)$$

Vi inför tidsindex j resp $j-1$ på ekvationerna 18 och 19 och inför dem i systemet 20. Därefter införes ekvation 9 och systemet 20 i ekvation 1. Då erhålles efter en del arbete:

$$t_{i',j} = \frac{1}{1+\xi} \cdot \left\{ (1-\xi) \cdot t_{i',j-1} + \frac{b}{p(p+1)} \cdot \left[\left(1+\frac{g}{i'-1}\right) \cdot 2 \cdot t_{bp} + \left(p - \frac{p^2 g}{i'-1}\right) \cdot (t_{i'-1,j} + t_{i'-1,j-1}) \right] + \frac{b \cdot \frac{d \ln \lambda}{dt}}{p^2 (p+1)^2} \cdot \left[t_{bp} + (p^2-1) \cdot t_{i',j-1} - p^2 \cdot t_{i'-1,j-1} \right]^2 \right\} \quad (21)$$

$$\text{där } \xi = \frac{b}{p} \cdot (1+(1-p) \cdot g/(i'-1))$$

För att ekvationen skulle bli så här enkel krävdes att analogen till $\frac{\partial t}{\partial x}$ i sista termen av ekvation 1 togs från ekvation 12, vilket inte påverkade noggrannheten.

Frontvandringsberäkning.

Så här långt kan vi alltså med ekvationerna 14, 15, 16, 17 och 21 beräkna alla temperaturerna i ett tidssteg så snart förra tidsstegets temperaturer är kända samt storheten p , som anger läget av kokpunktsisotermen.

Efter varje ny beräkning av temperaturer i ett tidssteg omräknas p enligt:

$$p = s - i' \quad (22)$$

där alltså i' är den punkt som ligger närmast innanför kokpunktsisotermen.

Storheten s erhålles ur:

$$s = \frac{R'}{\Delta x} + 1 \quad (23)$$

där R' är avståndet från centrum till isotermin. R' måste beräknas ur en värmebalans.

Det finns många sätt att utföra denna värmebalans. Här användes en metod som ger en helt stabil lösning till priset av relativt stort beräkningsarbete. Värmebalansen kan då uttryckas:

$$q = q_{in} - q_{acc} \quad (24)$$

D v s effekten q blir över för vattenavkokning när effekten q_{acc} använts för uppvärmning. Genom ytan införd effekt är q_{in} . Ur q beräknas nytt R' enligt:

$$R'_j = R'_{j-1} - \frac{q \cdot \Delta \tau}{A'_j \cdot \vartheta \cdot \gamma \cdot (c - c_{cr})} \quad (25)$$

där A'_j är ytan vid kokpunktsisotermin:

$$\left. \begin{aligned} A'_j &= 4 \cdot \pi \cdot (R'_{j-1})^2 \quad (\text{för sfär}) \\ \text{och } A'_j &= A \quad (\text{för platta}) \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

Medelvattenhalten i skorpan /1/ fås enligt formeln:

$$c_{cr} = \frac{c \cdot (t_{bp} - 93)}{t_{n+1} - 93} \quad (27)$$

Ingående värmeeffekt q_{in} erhålles ur:

$$q_{in} = A \cdot \alpha \cdot (t_{\infty} - t_{n+1}) \quad (28)$$

Den ackumulerade effekten (för uppvärmning) måste integreras fram eftersom värmekapaciteten är temperaturberoende:

$$\text{sfär } q_{acc} = \frac{4 \cdot \pi \cdot S \cdot \Delta x^3}{3 \cdot \Delta \tau} \cdot \sum_{i=1}^n [i^3 - (i-1)^3] \cdot c_p \cdot (t_{i,j} - t_{i,j-1}) \quad (29)$$

$$\text{platta: } q_{acc} = \frac{A \cdot S \cdot \Delta x}{\Delta \tau} \cdot \sum_{i=1}^n c_p \cdot (t_{i,j} - t_{i,j-1})$$

För stekskorpan användes en reducerad värmekapacitet eftersom vattenhalten där är låg:

$$(c_p)_{red} = c_p - c_{pv} \cdot (c - c_{cr}) \quad (30)$$

De hittills genomgångna ekvationerna är tillräckliga för att simulera värmetransport i platta eller sfär där en torkzon rör sig inåt. Men för att med programmets hjälp kunna testa olika modeller bör för det första fysikaliska konstanter vara funktioner av variabler som kontinuerligt ändras under stekningen. För det andra bör programmet beräkna biresultat såsom vattenförlust, ytfärg, skorptjocklek m m.

Fysikaliska konstanter

Värmeledningstalet λ omräknas vid varje punkt enligt följande ekvation /1,2/:

$$\lambda = (1 - \varphi) \cdot (0.50 - 0.92 \cdot f + 0.0024 \cdot t_{i,j-1}) + \lambda_c \cdot \frac{t_{i,j-1} - t_{i-1,j-1}}{\Delta x} +$$

$$\varphi \cdot \left[0.10 + 0.004 \cdot \exp(0.08 \cdot t_{i,j-1}) \right] \quad (31)$$

Den första termen sättes $= (1 - \varphi) \cdot \lambda_{\text{fix}}$ om $\lambda_{\text{fix}} > 0$ för att man skall ha möjlighet att använda konstant värmeledningstal. Porositeten φ är en funktion av temperaturen enligt /1/:

$$\varphi = \varphi_0 \cdot \exp\left(\varphi_k \cdot \frac{t_{i,j-1} - 100}{100}\right) \quad (32)$$

Densiteten räknas bara om när receptet ändras eftersom dess temperaturberoende är så svagt /2/:

$$\rho = 1300 - 300 \cdot c - 400 \cdot f - (0.4 \cdot c + 0.7 \cdot f) \cdot 50 \quad (33)$$

Värmekapaciteten omräknas samtidigt med värmeledningstalet /2/:

$$c_p = 1600 + 2600 \cdot c + 15 \cdot t_{i,j-1} \cdot f \quad (34)$$

Ekvationer för vattenförlust m m.

Den vattenmängd som avkokar per tidsenhet är:

$$w_{out} = \frac{q}{\gamma} \quad (35)$$

Denna integreras kontinuerligt för att ge totala vattenförlusten vid varje tidpunkt (uttryckt som viktsbråk):

$$w_j = w_{j-1} + \frac{w_{out} \cdot \Delta \tau}{\delta \cdot Vol} \quad (36)$$

där Vol är

$$\begin{cases} \text{platta: } Vol = A \cdot R \\ \text{sfär: } Vol = \frac{4 \cdot \pi \cdot R^3}{3} \end{cases} \quad (37)$$

Stekskorpans tjocklek beräknas enligt:

$$\delta = R - R' \quad (38)$$

Medeltätheten integreras fram enligt följande:

$$\rho_{\text{medel}} = \frac{1}{\frac{4 \cdot \pi \cdot R^3}{3}} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{4 \cdot \pi}{3} \cdot \left[(i+1)^3 \cdot \Delta x^3 - i^3 \cdot \Delta x^3 \right] \cdot (1 - \varphi_i)$$

som alltså gäller sfär. För platta erhålles:

$$\rho_{\text{medel}} = \frac{1}{A \cdot R} \cdot \sum_{i=1}^n A \cdot \left[(i+1) \cdot \Delta x - i \cdot \Delta x \right] \cdot (1 - \varphi_i)$$

Dessa formler kan förenklas (ekvation 8 användes):

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{sfär:} \quad \frac{1}{n^3} \sum_{i=1}^n (i^2 + i + 1) \cdot (1 - \varphi_i) \\ \text{platta:} \quad \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (1 - \varphi_i) \end{array} \right. \quad (39)$$

När tätheten sjunker, vid t ex köttbullsfritering, ökar radien till värdet R_s :

$$\left\{ \begin{array}{l} R_s = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot (m-w)}{4 \cdot \pi \cdot \rho_{\text{medel}}}} \quad (\text{gäller sfär}) \\ R_s = \frac{m/2-w}{A \cdot \rho} \quad (\text{gäller platta}) \end{array} \right. \quad (40)$$

R_s är radien för den svällda produkten. Mätningar av denna radie har gjorts, varför det var lämpligt att låta programmet skriva ut R_s .

För ytljusheten används den empiriska ekvationen /1/:

$$\left. \begin{aligned} L &= L_0 \cdot \exp(-k \cdot \tau \cdot \tau_{\text{korrr}}) \\ \text{där } k &= 3300 \cdot \exp\left(-\frac{6000}{t_{\infty} + 273}\right) \\ \text{och } \tau_{\text{korrr}} &= 1 + 10^{\log\left(\frac{R}{0.016}\right) \cdot 0.277 \cdot (g+1)} \end{aligned} \right\} \quad (41)$$

Värmeövergångstalet är funktion av w_{out} /1/:

$$\alpha = \alpha_0 + c_{\alpha} \cdot (w_{\text{out}})^{f_1} \quad (42)$$

Även omgivningstemperaturen är en funktion av ångavgången:

$$t'_{\infty} = (t_{\infty} - t_{\text{bp}}) \cdot \exp(-f_2 \cdot w_{\text{out}}) + t_{\text{bp}} \quad (43)$$

vilket har sin praktiska tillämpning vid kontaktstekning av biffar. När $f_2 = 0$ sätts funktionen som synes ur spel.

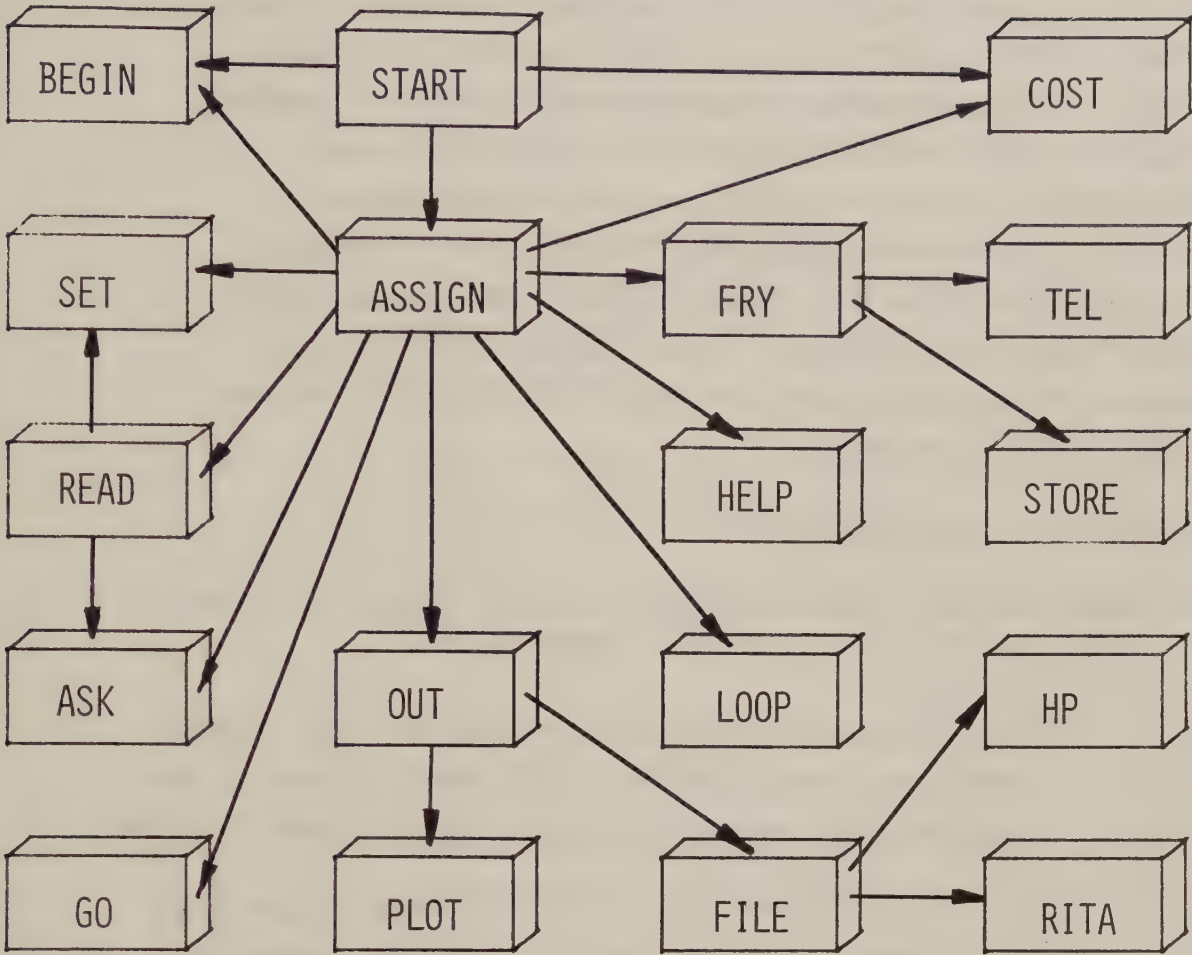
Programstruktur.

Som inledningsvis nämndes används datorspråket FORTRAN V. Språket har förstärkts med ett femtontal egna subrutiner skrivna i ASSEMBLER (för Univac 1108). Programmet är utfört som ett dialogprogram för terminalanvändning och har därför försetts med en kommandostruktur som gör det lätt att kommunicera med datorn.

Programmet är uppbyggt av ett kort huvudprogram och 17 subrutiner. Dessa 18 fortranprogram anropar dels varandra dels ett bibliotek på 18 subrutiner eller funktioner, skrivna i företrädesvis Assembler för att spara exekveringstid och minnesutrymme.

Figur 3.

REFERENSSCHEMA ÖVER STEKPROGRAMMET "FRY"



SUBROUTINBIBLIOTEK:

COMMON-BLOCK:

P	PL
PM	PV
PR	PRS
SJ	SS
RPP	OPTION
TADOC	PRICE
BT	SC
IE	ID
RE	RD

CONTR
SETVAL
CALC
RESULT
TEST

Föreg. sida (fig 3) visar vad de olika rutinerna heter och hur de anropar varandra. Så anropar t ex stekrutinen "FRY" en rutin "STORE", som har till uppgift att lagra resultat i en COMMON-area i kärnminnet. Denna kan senare läsas av rutinen "OUT" som skriver ut resultaten på terminalen eller ritar upp dem på en Hewlett Packard X-Y-Plotter. Det finns fem COMMON-block, men de flesta rutiner använder bara ett fåtal av dem. Till programmet är också 8 datafiler knutna. Dessa används för in- och utmatning. Programmets instruktioner och datafält upptar ca 28000 ord i kärnminnet.

Beskrivning av subrutiner.

Nedan följer en kort beskrivning av vad de olika rutinerna gör:

<u>START</u>	Sätter grundvärden på de variabler som ingår i COMMON-blocket "SETVAL". Skriver ut rubrik och version samt anropar tillordningsrutinen "ASSIGN".
<u>ASSIGN</u>	Denna rutin återfår hela tiden kontrollen över programmet efter att en subrutin anropats och står i förbindelse med användaren via kommunikationsrutinen "PRS".
<u>BEGIN</u>	Denna rutin lägger upp punktgifter på lämpligt sätt och beräknar en del konstanter som kommer att användas i rutinen "FRY". Dessutom sköter den utskrift av aktuella indata och gör tabellhuvuden i filerna.
<u>READ</u>	"READ" sköter inläsning av datablock från en fil, d v s hela uppsättningar av indata. En viss steklinje har kanske ett tiotal konstanter, som man vill läsa in varje gång man börjar.
<u>SET</u>	Med hjälp av denna rutin kan man sätta värden på en eller flera parametrar.
<u>ASK</u>	Med "ASK" har man möjlighet att fråga efter värden på parametrar och även efter en del beräknade värden.

<u>FRY</u>	Denna rutin är det egentliga stekprogrammet. Den avbryter stekningen så snart ett åsatt villkor uppfyllts, t ex att yttemperaturen nått ett visst värde. Det finns fem sådana testvariabler, nämligen centrum- och yttemperatur, vattenförlust, ljushet och tid. Sedan kan man med nytt kommando fortsätta att steka från den punkt där man avbröt, och då med någon eller några parametrar ändrade, t ex ett annat värmeövergångstal.
<u>STORE</u>	Denna rutin lagrar vid t ex var 20:e tidssteg vissa resultat i kärnminnet.
<u>TEL</u>	"TEL" sköter simuleringen av ett tänkt instuckat termoelement av viss tjocklek och typ /7/.
<u>COST</u>	Ger kostnaden för olika delsteg eller t ex för hela körningen.
<u>OUT</u>	Sköter om viss utmatning och styr de övriga utmatningsrutinerna: PLOT, FILE, HP och RITA.
<u>PLOT</u>	Sköter om ritning av temperaturkurvor på HP-plottern.
<u>FILE</u>	Styr överföring av resultat till filer.
<u>HP</u>	Rutin som lagrar temperaturdata på filer för senare läsning med "PLOT".
<u>RITA</u>	Denna rutin sköter all plottning på radskrivaren. Det går sålunda att rita t ex vattenförlust, effektkurvor, ljushet m m som funktion av tiden.
<u>LOOP</u>	Med denna viktiga rutin besparar man sig mycket arbete vid simuleringsarbetet. "LOOP" övertar kontrollen från "ASSIGN" under det att användaren i "loop-mode" själv skriver ett litet program över hur datorn skall köra. Loop-program kan också läsas in från fil.

GO Denna rutin läser loop-programmet och styr verksamheten ända tills loop-programmet är slut.

HELP Med hjälp av "HELP" kan användaren få hjälp!
(om han händelsevis har glömt bort något kommando).

Rutinerna: Assign, Set, Read, Ask, Loop, Go, Rita, Plot, HP, Cost och Help är framtagna för att få en bekväm styrning av programmet. De är av allmän karaktär och kan därför användas i andra program, där man vill ha en kommandostruktur av samma slag som här. Subrutinbiblioteket har ännu mer allmän karaktär, varför detta återfinnes hos många andra program. En kort presentation:

PL	Print line
PR	Print med read (på samma rad)
P	Print
SS	Sort string
PRS	Print, read and sort
PM	Print message
PV	Print variable

Dessa subrutiner sköter om input och output istället för Fortrans mer minnes- och tidskrävande in/out-rutiner.

ID	Integer decode
RD	Read decode
IE	Integer encode
RE	Real encode
SC	Shift circular

Dessa funktioner ingår i ett texthanteringspaket, som behövs bl a för att slippa fortrans mer resurskrävande ENCODE/DECODE-funktioner. Övriga:

RPP	Read processor parameter
OPTION	Options in the processor call
TADOC	Time and date of creation
PRICE	Prices
SJ	Set and jump
BT	Block transfer

Kommandostrukturen.

När programmet har bearbetat något får man som klartecken utskriften:

ASG*>

Det betyder att programmet befinner sig i "ASSIGN-mode". Här kan 9 olika kommandon skrivas, som styr programmets verksamhet. Med vagnretur utan kommando alls, övergår programmet till "LOOP-mode". Här användes som klartecken:

LP**>

Förutom de 9 assign-mode-kommandona kan verksamheten i loop-mode styras med 7 kommandon. Kommandon med bl a repetitionsfunktion kan användas. Allt lagras i minnet tills kommandot "GO", då alla lagrade kommandon utföres i tur och ordning.

En inmatningsrad består i regel av flera kommandoord samt ev variabelnamn och värden. Alla kommandon kan avkortas till sin första bokstav. Inga ord eller data på raden får innehålla mer än 6 tecken. Orden separeras från varandra med ett eller flera blanktecken (space).

I bilaga 2 finns alla kommandon beskrivna.

Exempel på körningar.

Låt säga att vi vill fritera en köttbulle i 3 minuter vid 160°C fettbadstemperatur och med α -värdet $300 \text{ W/m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, tills ytan börjar koka märkbart, därefter med α -värdet $600 \text{ W/m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, varefter resulterande centrumtemperaturkurva ritas upp på HP-plottern.

Då kan följande samtal uppstå mellan dator och användaren:
(Det användaren skriver föregås alltid av "hake" (>).)

>@FRY

FRYING VERS. 780823 15.35

ASG*>READ 8

NUMBER OF READ LINES WAS 3

ASG*>SET TIMAX 180 TEMP 160

ASG*>BEGIN

ASG*>ASK ALPHA N
ALPHA 300.00
N 24

ASG*>FRY UNTIL WLOSS .25

ASG*>ASK TIME CTEMP STEMP WLOSS
TIME 28.000
CTEMP 5.0000
STEMP 102.77
WLOSS .25037

ASG*>SET ALPHA 600

ASG*>FRY

ASG*>OUT HPLOT CTEMP

ASG*>EXIT

>

Om man skall utföra en hel serie stekningar är det bekvämt att använda loop-mode. Låt oss därför anta att en biff skall kontaktstekas vid hålltemperaturerna 150, 170, 190 och 210°C. För varje hålltemperatur skall 3 biftjocklekar testas: 10, 12 och 15 mm. Resultaten skall sedan skrivas i tabellform.

Då kan kommunikationen utfalla sålunda:

```
>@FRY
```

```
FRYING          VERS. 780823 15.35
*****
```

```
ASG*>READ 6
```

```
NUMBER OF READ LINES WAS 4
```

```
ASG*>
```

```
LP**>DO THICK .01 .012 .015
```

```
LP**>DO TEMP 150 170 190 210
```

```
LP**>BEGIN
```

```
LP**>FRY
```

```
LP**>OUT SAVE
```

```
LP**>GO
```

```
ASG*>OUT TABLE ALL
```

```
ASG*>EXIT
```

```
>
```

Det bör åter noteras att alla kommandon kan skrivas med bara första bokstaven så att "OUT HP PLOT CTEMP ALL" kan skrivas: "O H C A". Detta gör det synnerligen lätt att använda programmet efter lite övning.

Om man skriver felaktig syntax får man alltid felmeddelanden, t ex av typen:

"UNKNOWN VARIABLE NAME" eller

"NO FIND OF BLOCK NUMBER 7" eller

"SECOND WORD IN ERROR" o s v.

I bilaga 3 finns ett antal exempel på utskrifter och plottar från kommandot "OUT".

Med dessa relativt enkla exempel avslutas den rent tekniska beskrivningen av programmet. En utförligare handledning för användaren finns vid avdelningen för livsmedelsteknik i Alnarp.

Praktiska tillämpningar.

Förutom de rent teoretiska tillämpningarna inom värme- och masstransport, kan man se framför allt två typer av användningsområden för programmet. Det ena är vid projektering av ny stekutrustning, det andra vid drift av befintliga linjer.

Vid projektering av flerstegsanläggningar, där man kanske lägger två stekmetoder efter varandra, kan programmet vara till stor hjälp. Det är då möjligt att beräkna optimala tider i de olika stekarna, tack vare att programmet kan bryta vid vissa uppnådda villkor och sätta om gränsvillkor (d v s stekmetod) och därefter fortsätta igen. Det blir mer och mer vanligt att man utnyttjar två steg vid stekning. Det sista steget kan helt enkelt utgöras av transportbandet från stekaren till frysrummet. Vare sig bandet täcks med en tunnel eller ej så ser datorn det som ett delsteg vid stekningen. (Till och med inne i frysen kan, om tiden dit inte är för lång, centrumtemperaturen fortsätta att stiga.) De som övergått till tvåstegsstekning har bl a funnit att förlusterna blir lägre. Med datorns hjälp kan man på kort tid och till ringa kostnad simulera ett stort antal stekförsök. Investeringar i pilotplantutrustning kan i vissa fall undvikas. Det finns exempel på felinvesteringar i stekutrustning p g a för lite kunskap om stekprocessens förhållande till produkten. Kunskap som kan inhämtas via datorsimuleringar.

Vid drift av en steklinje förekommer många störningar som påverkar resultatet. Det kan vara t ex att frityrfett åldras, variation i ingående smetens recept eller temperatur. Men det förekommer framför allt medvetna förändringar av stekparametrar. Ett vanligt problem är följande:

"Ifall jag blir tvungen att ändra en parameter, hur mycket skall då andra parametrar ändras för att resultatet skall bli det samma." Sådana situationer är givetvis tilltalande för en dator. Det fordras inte att man har datorn på platsen, utan man kan i förväg göra upp tabeller eller diagram för de tänkbara situationer som kan uppstå. Ett exempel från hösten 1977 skall här ges för att belysa hur datorn kan användas för att bidra till en jämn produktion.

En producent hade helt enkelt problem att hålla ingående smetens temperatur konstant. Man hade av praktiska och lokaltekniska skäl 6 å 7 °C högre smettemperatur på eftermiddagarna. Det resulterade i för höga förluster, varför man ökade bandhastigheten något. Då blev produkterna något ljusare, vilket ej accepterades av smakpanelen. Man höjde därför samtidigt temperaturen i stekaren. Men då påverkades åter förlusterna, varefter man fick korta stektiden ytterligare o s v. Detta problem är naturligtvis inte så svårt att lösa manuellt efter en tids arbete, men har man ett stort sortiment så fordrar i regel varje produkt sin egen tabell eller "lathund" för hur de optimala korrektionerna ser ut för en viss ändring i ingående smettemperatur. Därför gjordes datasimuleringar över processen, vilket gav som resultat två derivator:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dt_{\infty}}{dt_0} = 2.6 \text{ } ^\circ\text{C}/^\circ\text{C} \\ \frac{d\tau}{dt_0} = - 9.1 \text{ } \text{s}/^\circ\text{C} \end{array} \right.$$

där stekarens temperatur är t_{∞}
och smettemperatur är t_0
och tiden är τ

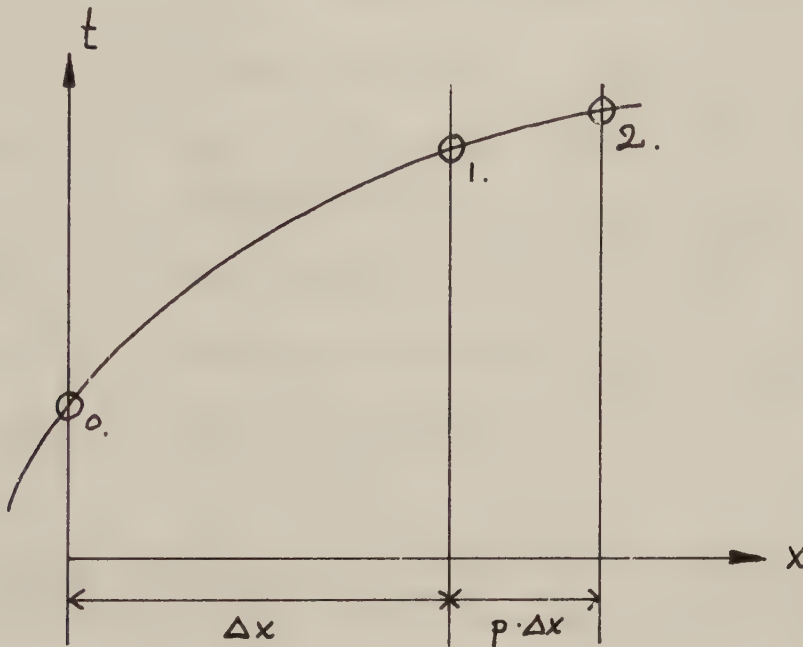
Det betyder att badtemperaturen skall höjas 2.6°C för varje grads fel i smettemperatur. Samtidigt skall stektiden minskas med 9 sekunder för varje grads fel i smettemperatur. I så fall bibehålles ett konstant stekresultat. Dessa siffror gäller givetvis bara för denna stekprocess och denna speciella produkt.

Referenser.

1. Sörenfors, P.
Matematiska modeller för stekning av köttfärsprodukter.
Rapport, 12 okt 1978, Livsmedelsteknik, Alnarp.
2. Sörenfors, P., Dagerskog, M.
Bestämning av värmetekniska data för köttfärs som funktion
av temperatur och receptur. SIK-rapport nr 434.
SIK, Göteborg.
3. Rosenberg, D.
Methods for the numerical solution of partial differential
equations, kapitel 1-2, New York 1969.
4. Mitchell, A.R.
Computational methods in partial differential equations,
kapitel 2, London 1969.
5. Milne, W.E.
Numerical solution of differential equations, kapital 8,
New York 1970.
6. Smith, G.D.
Numerical solution of partial differential equations,
kapitel 1-2, London 1965.
7. Sörenfors, P.
Mätning av centrumtemperatur med termoelement under
stekning.
Rapport 4 sept 1978, Livsmedelsteknik, Alnarp.

Härledning av analoger för första och andra derivatan i ett system med olika avstånd mellan närliggande punkter.

För att erhålla analoger där felet är proportionellt mot $(\Delta x)^2$, lägges en andragradsfunktion genom tre punkter benämnda 0, 1 och 2.



Koordinatsystemet lägges som i figuren. Antag att:

$$t = a \cdot x^2 + b \cdot x + c$$

De tre punkterna skall alla satisfiera ovanstående ekvation:

$$\begin{cases} t_0 = c \\ t_1 = a \cdot \Delta x^2 + b \cdot \Delta x + c \\ t_2 = a \cdot \Delta x^2 \cdot (p+1)^2 + b \cdot \Delta x \cdot (p+1) + c \end{cases}$$

Detta ekvationssystem har lösningen:

$$\begin{cases} a = \frac{(t_2 - t_1) - p \cdot (t_1 - t_0)}{\Delta x^2 \cdot p \cdot (p+1)} \\ b = -\frac{(t_2 - t_1) - p(p+2) \cdot (t_1 - t_0)}{\Delta x \cdot p \cdot (p+1)} \\ c = t_0 \end{cases}$$

Om ursprungsekvationen deriveras och konstanterna a och b insättes samt x sättes lika med Δx (eftersom punkt 1 betraktas) erhålles:

$$\begin{cases} \left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)_1 = \frac{t_2 + (p^2 - 1) \cdot t_1 - p^2 \cdot t_0}{\Delta x \cdot p \cdot (p+1)} \\ \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}\right)_1 = \frac{2 \cdot [t_2 - (p+1) \cdot t_1 + p \cdot t_0]}{\Delta x^2 \cdot p \cdot (p+1)} \end{cases}$$

<u>KOMMANDON</u>	(första ordet)
ASK	Fråga efter värden på variabler i /SETVAL/- och /TEST/- commonblock.
BEGIN	Lägg ut punktgifter och beräkna startvärden.
COST	Ange databehandlingskostnad.
(DO)	Inför looprad med repetitionsfunktion.
EXIT	Stoppa programmet.
FRY	Stek tills visst villkor uppfyllts för en /TEST/-variabel.
(GO)	Kör loopen.
HELP	Beskriv kommandonas funktion och syntax.
(LINE)	Gå till viss looprad.
(MOVE)	Flytta rader i loopen.
(NOTEXT)	Ta bort filtext.
OUT	Utmatning av resultat.
(PRINT)	Skriv ut loopraderna.
READ	Läs in datablock från fil.
SET	Sätt värden på variabler.
(<heltal>)	Läs looprader från fil.
<ingenting>	Skifta mellan "assign-mode" och "loop-mode".

Kommandon inom parentes: Bara i LOOP-mode.

Alla kommandon kan avkortas till dess första bokstav.

Kommandon i ASSIGN-mode (Syntax)

ord 1	ord 2	ord 3	ord 4	ord 5	ord 6
ASK	(variabel)	(variabel)	(variabel)	(variabel)	etc
BEGIN	$\left\{ \begin{array}{l} \text{PRINT} \\ \text{FILES} \\ (\quad) \end{array} \right\} \dots \left\{ \begin{array}{l} \text{PRINT} \\ \text{FILES} \\ (\quad) \end{array} \right\}$				
COST	$\left\{ \begin{array}{l} . \\ + \\ - \\ (\quad) \end{array} \right\}$				
EXIT					
FRY	$\left\{ \begin{array}{l} \text{UNTIL} \\ \text{CHANGE} \\ (\quad) \end{array} \right\} \dots \left\{ \begin{array}{l} \text{CTEMP} \\ \text{STEMP} \\ \text{TIME} \\ \text{BRIGHT} \\ \text{WLOSS} \end{array} \right\} \quad (\text{värde})$				
HELP	$(\quad)$ (kommando)				
OUT	$\left\{ \begin{array}{l} \text{HPLOT} \dots \left\{ \begin{array}{l} \text{CTEMP} \\ \text{STEMP} \\ \text{PROFIL} \end{array} \right\} \dots \left\{ \begin{array}{l} \text{ALL} \\ (\quad) \end{array} \right\} \\ \text{SAVE} \\ \text{PRPLOT} \dots \left\{ \begin{array}{l} \text{ALL} \\ (\quad) \end{array} \right\} \\ \text{LIST} \\ \text{TABLE} \end{array} \right\} \dots \left\{ \begin{array}{l} \text{ALL} \\ \text{HEAD} \\ \text{LAST} \end{array} \right\}$				
READ	$(\text{heltal}) \dots \left\{ \begin{array}{l} (\quad) \\ \text{PRINT} \end{array} \right\}$				
SET	(variabel)	(värde)	(variabel)	(värde)	etc

Kommandon i LOOP-mode (Syntax)

ord 1	ord 2	ord 3	ord 4	ord 5
DO	(set-variabel)	(värde)	(värde)	...etc.

GO

LINE	{ ()
	(heltal)
	+
	-

MOVE	{ +
	-

NOTEXT

PRINT

<heltal>

()

<assign-mode-kommando>

Exempel på utskrift av "TABLE".

SMETTEMP (C)	25.0	BULLVIKT (G)	17.5
BADTEMP (C)	160.0	VATTENHALT (%)	66.0
MAXTID (SEK)	240.0	FETTHALT (%)	14.0

TID (SEK)	CENTER- TEMP (C)	VIKTS- FRL (%)	LJUS- HET (%)
10.00	25.00	.00	23.24
20.00	25.00	1.25	22.51
30.00	25.00	3.81	21.80
40.00	25.00	5.73	21.12
50.00	25.03	7.49	20.45
60.00	25.12	9.05	19.81
70.00	25.37	10.46	19.18
80.00	25.90	11.76	18.58
90.00	26.80	12.98	17.99
100.00	28.14	14.15	17.43
110.00	29.95	15.27	16.88
120.00	32.19	16.33	16.35
130.00	34.83	17.33	15.83
140.00	37.80	18.30	15.33
150.00	41.00	19.22	14.85
160.00	44.36	20.13	14.38
170.00	47.80	21.00	13.93
180.00	51.26	21.85	13.49
190.00	54.68	22.67	13.07
200.00	58.01	23.46	12.65
210.00	61.24	24.23	12.26
220.00	64.32	24.98	11.87
230.00	67.25	25.71	11.50
240.00	70.01	26.43	11.13

Exempel på utskrift av "LIST".

TEMPERATUR- OCH VATTENFÖRHÅLLANDEN VID KOTTBULLSGRITERING

FYSIKALISKA STORHETER

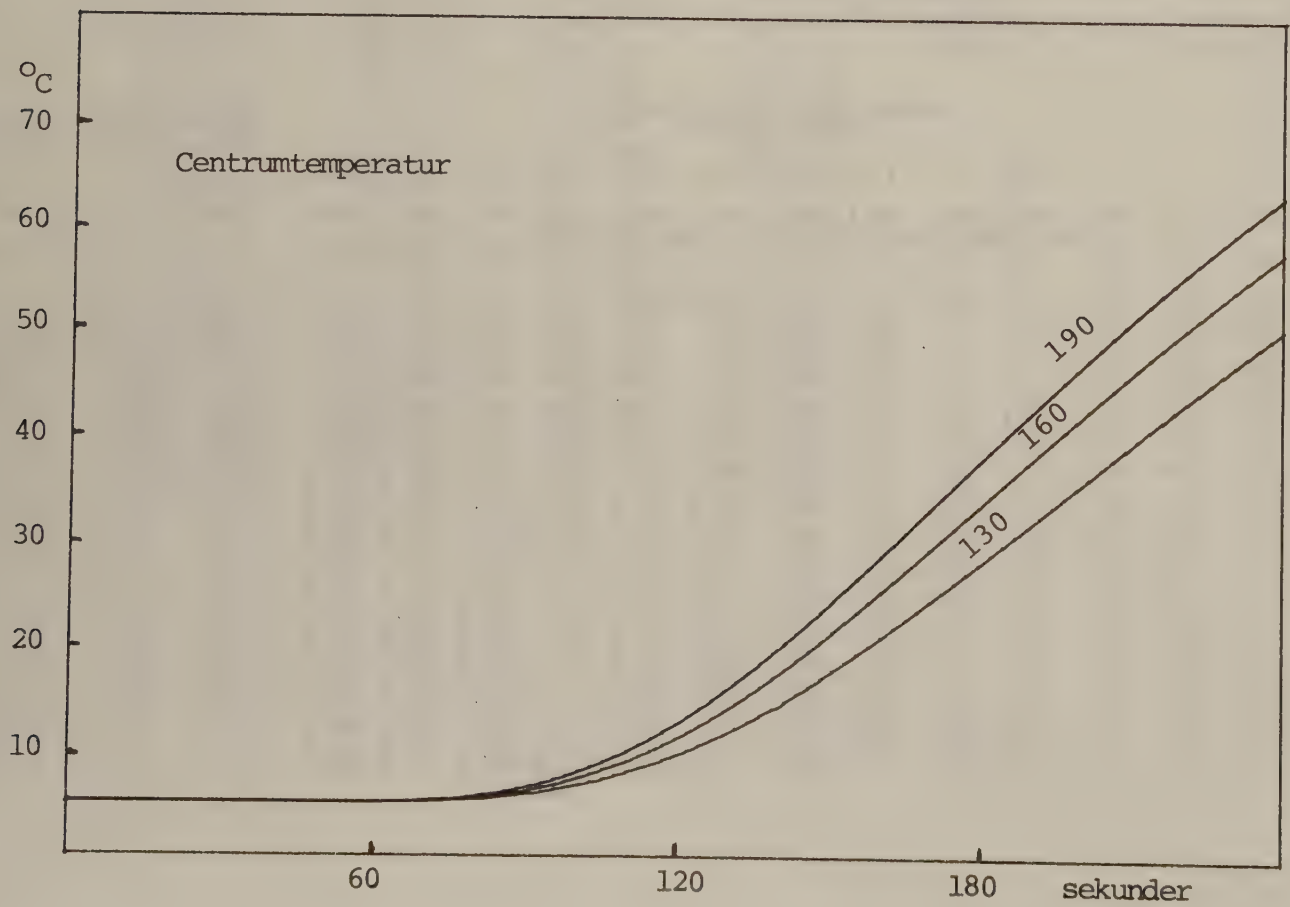
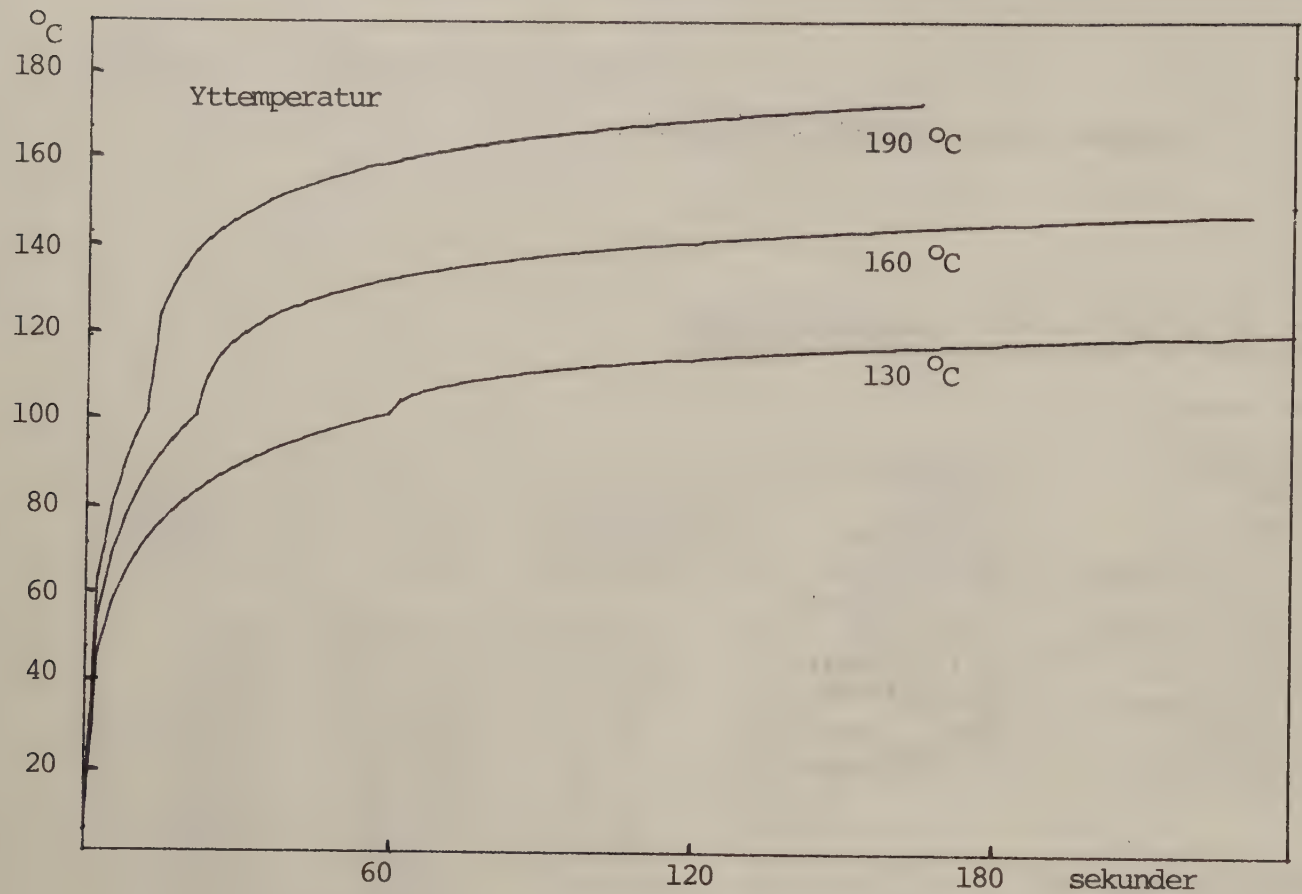
BEGYNNELSETEMPERATUR 25. GRADER
OLJANS TEMPERATUR 160. GRADER
KOTTBULLSVIKT .0175 KG
KOTTBULLSRADIE .0160 METER
TÄTHET FÖR KOTTFÄRS 1023. KG/M**3
FETTHALT FÖR KOTTFÄRS .140 KG/KG
VÄRMEKAPACITET FÖR KOTTFÄRS A= 3421. J/KG,GRAD
C= AID*(TEMP-50) B= 2.10 J/KG,GRAD**2
VÄRMELEDNINGSTAL I YTSKIKT .90 W/M,GRAD
VÄRMELEDNINGSTAL I KOTTFÄRS A= .49 W/M,GRAD
LAMBDA=A+B*(TEMP-50) B= .0024 W/M,GRAD**2
VÄRMEÖVERGANGSTAL 300. W/M**2,GRAD
VATTENHALT HOS KOTTFÄRS .660 KG/KG
ÅNGBILDNINGSVÄRME 2250000. J/KG
VATTNETS KOKPUNKT 100. GRADER
VATTNETS VÄRMEKAPACITET 4200. J/KG,GRAD

BERÄKNINGSTEKNISKA UPPGIFTER

MAXTID 240. SEK
TIDSTEG .20 SEK
LÅNGSTEG .000798 METER
DELNING AV RADIEN 20 DELAR
B (VID 50 GRADER) .044

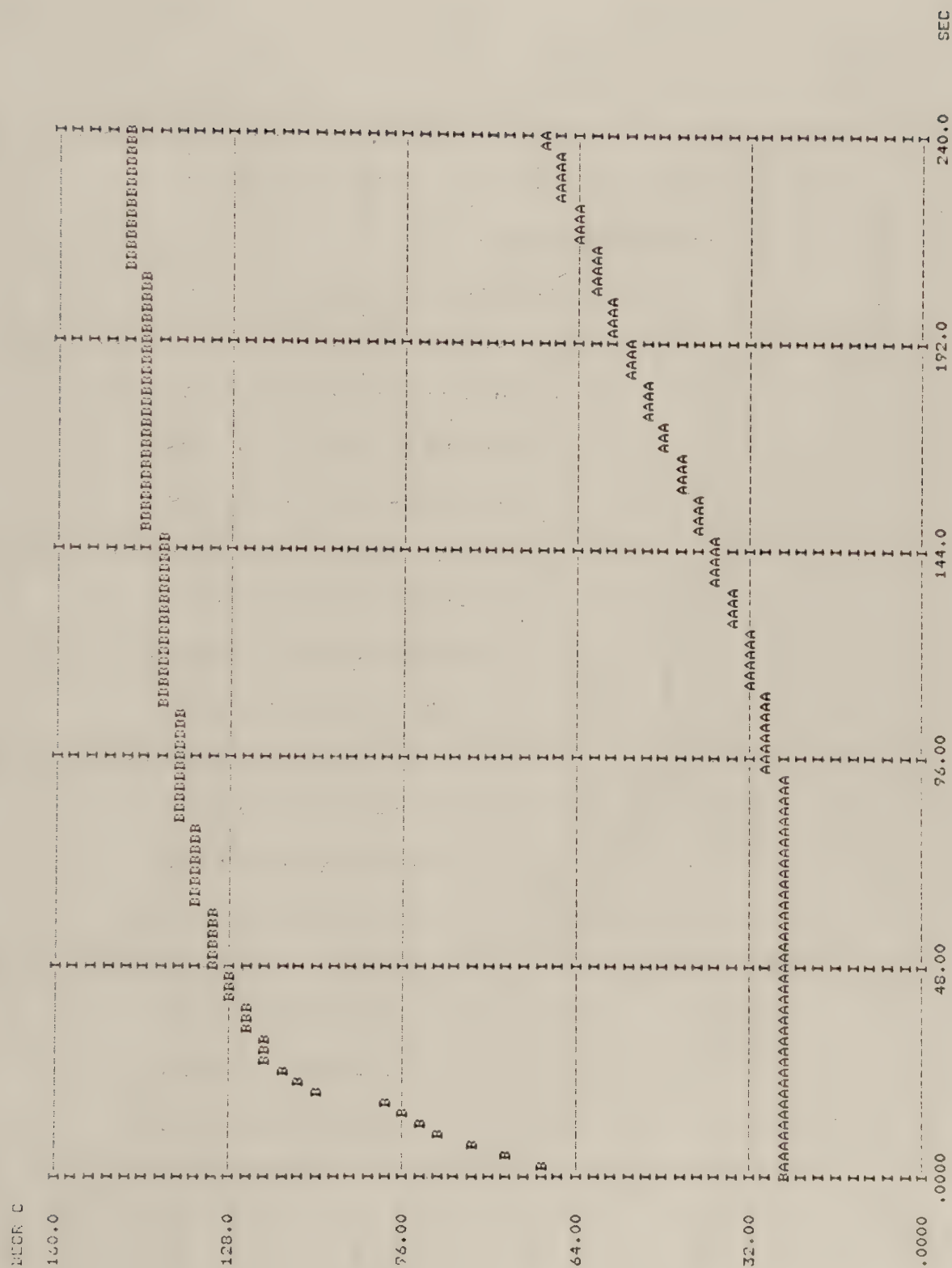
TID (SEK)	TEMPERATUREN I OLIKA PUNKTER (GRADER CELSIUS)													FRONT (HY/S)	SKORPA (MM)	SVINN (GRAM)
	I= 1	I= 4	I= 7	I=10	I=13	I=14	I=15	I=16	I=17	I=18	I=19	I=20	I=21			
10.0 *	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.1	25.3	24.0	23.1	33.7	45.6	65.1	90.5	.000	.000	.000
16.4 *	25.0	25.0	25.0	25.0	25.2	25.6	26.7	29.2	34.4	44.0	53.7	78.0	100.0	.00	.00	.00
20.0 *	25.0	25.0	25.0	25.0	25.5	26.3	28.1	31.3	38.6	49.5	65.1	84.7	113.6	41.798	.245	.219
30.0 *	25.0	25.0	25.0	25.2	27.5	29.9	34.1	40.7	50.5	63.3	78.5	94.8	122.5	23.637	.542	.667
40.0 *	25.0	25.0	25.1	26.0	31.1	35.3	41.5	49.9	60.4	72.7	86.0	99.3	126.9	19.603	.755	1.003
50.0 *	25.0	25.1	25.4	27.5	35.9	41.4	48.7	57.6	68.0	79.2	90.9	105.0	130.4	18.573	.951	1.311
60.0 *	25.1	25.3	26.2	29.8	41.1	47.5	55.2	64.1	73.8	84.0	94.2	110.0	132.7	16.660	1.126	1.535
70.0 *	25.4	25.7	27.4	32.8	46.3	53.0	60.8	67.3	78.4	87.6	96.6	113.7	134.5	15.398	1.286	1.831
80.0 *	25.9	26.5	29.1	36.3	51.2	58.1	65.6	73.7	82.0	90.4	98.4	116.8	136.1	14.477	1.435	2.058
90.0 *	26.8	27.7	31.3	40.0	55.8	62.5	69.8	77.4	85.0	92.6	99.8	117.4	137.3	13.812	1.577	2.271
100.0 *	28.1	29.4	34.0	43.8	60.0	66.5	73.4	80.4	87.5	94.4	102.9	121.7	138.6	13.687	1.716	2.477
110.0 *	29.9	31.5	36.9	47.6	63.7	70.0	76.5	83.1	89.6	95.9	102.6	123.7	139.6	13.113	1.850	2.672
120.0 *	32.2	34.1	40.2	51.3	67.2	73.2	79.3	85.4	91.4	97.1	103.6	125.4	140.4	12.651	1.978	2.857
130.0 *	34.8	36.9	43.5	54.9	70.3	76.0	81.7	87.4	92.9	98.2	104.0	126.9	141.2	12.272	2.103	3.033
140.0 *	37.8	40.0	46.9	58.3	73.2	78.5	83.8	89.1	94.2	99.0	103.1	128.3	142.0	11.755	2.224	3.202
150.0 *	41.0	43.3	50.4	61.6	75.7	80.7	85.7	90.6	95.3	99.7	103.6	129.6	142.6	11.687	2.342	3.364
160.0 *	44.4	46.7	53.7	64.7	79.1	82.8	87.4	91.9	96.2	100.3	103.8	130.7	143.3	11.649	2.459	3.522
170.0 *	47.8	50.2	57.0	67.6	80.2	84.6	88.9	93.1	97.1	100.6	103.8	131.8	143.8	11.377	2.574	3.675
180.0 *	51.3	53.6	60.2	70.3	82.2	86.2	90.2	94.1	97.8	101.7	105.0	132.8	144.3	11.185	2.687	3.823
190.0 *	54.7	56.9	63.3	72.8	84.0	87.7	91.4	95.0	98.4	102.6	105.4	133.7	144.8	11.000	2.798	3.967
200.0 *	58.0	60.2	66.2	75.2	85.5	89.1	92.5	95.8	98.9	102.4	105.7	134.6	145.3	10.839	2.907	4.105
210.0 *	61.2	63.3	69.0	77.4	87.1	90.3	93.5	96.5	99.4	102.0	105.0	135.4	145.7	10.698	3.015	4.240
220.0 *	64.3	66.2	71.6	79.5	88.4	91.4	94.4	97.2	99.8	102.6	105.0	136.1	146.1	10.574	3.121	4.371
230.0 *	67.2	69.0	74.1	81.4	89.7	92.4	95.1	97.7	100.4	102.4	104.1	136.8	146.5	10.706	3.226	4.499
240.0 *	70.0	71.7	76.3	83.1	90.8	93.4	95.8	98.2	100.4	102.4	103.5	137.4	146.7	10.631	3.331	4.625

Exempel på kurvritning på HP XY-plotter ("HPPLOT")

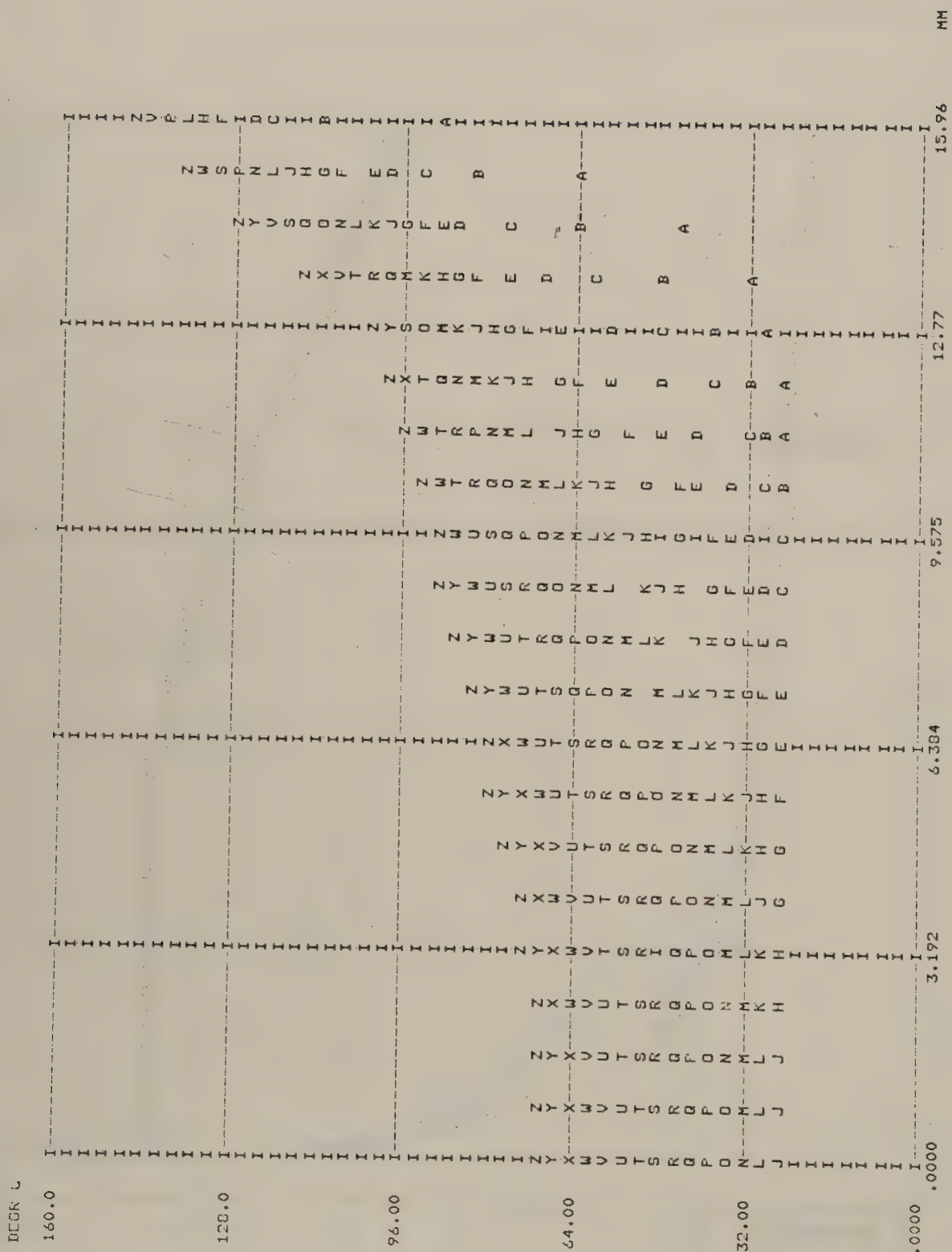


Exempel på kurvritning på radskrivare ("PRPLOT")

Yttemperatur och centrumtemperatur



Temperaturprofiler



Viktsförlust

2110

3.515

3.055

682.2

1.526

7630

0000

0000

45.00

92.00

144-0

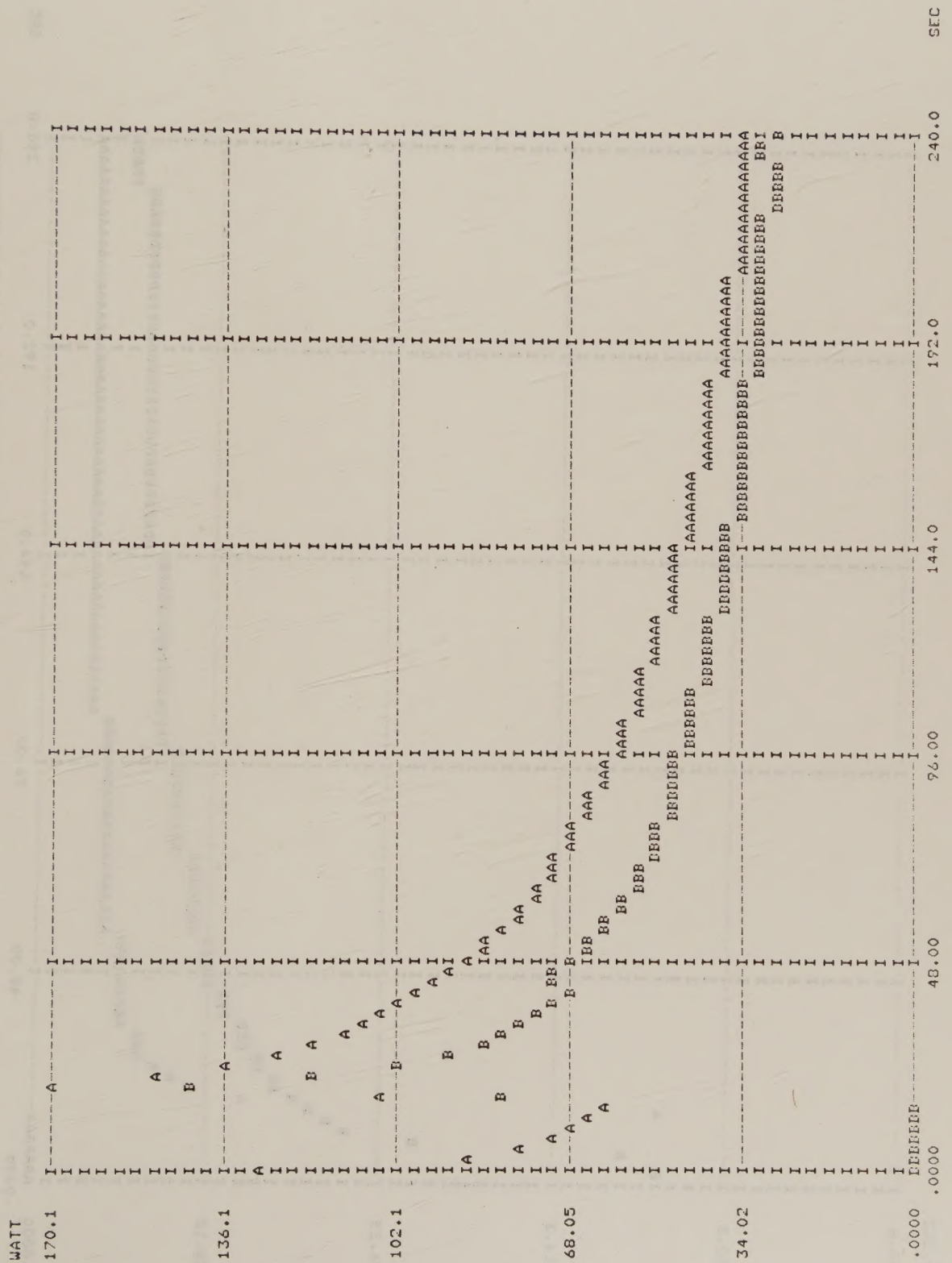
151

→ ()

D
L
C

[illegible]

Effektkurvor



[illegible]

CURVE B SHOWS THE STABILITY OF THE MATHEMATICAL SOLUTION

16.60

